Reinhard Breuer
Chefredakteur

Sternstunde am Ende der Steinzeit

Am Anfang stand Verwirrung, Spekulation und sogar Betrugsverdacht. Hatte der Gletscher in den Südtiroler Hochalpen im warmen September vor zwölf Jahren nur einen verlorenen Bergsteiger freigegeben? War die Leiche eine Fälschung, wie 1993 zwei Autoren behaupteten? Oder gar nur ein Witz für die Medien: Hatte etwa Reinhold Messner, der tatsächlich zufällig in der Nähe weilte, eine ägyptische Mumie nach Europa gebracht und auf den über 3000 Meter hohen Alpenpass platziert?

Nichts von alledem hielt der womöglich umfangreichsten wissenschaftlichen Untersuchung stand, der je ein Individuum unterworfen wurde: der »Eismann«, im Volksmund »Ötzi« genannt. Rasch versammelte sich ein eindrucksvolles interdisziplinäres und internationales Forscherteam – Archäologen, Botaniker, Klimatologen, Radiologen, Humanbiologen, Genetiker, Mediziner und Molekularbiologen –, um dem Mann aus der späten Jungsteinzeit seine Geheimnisse zu entlocken. Nach zwölf Jahren ziehen sie jetzt eine überraschende Bilanz – denn vieles, was zunächst glaubhaft schien, gilt heute nicht mehr. Analysen ergeben erstaunliche, neue Hinweise auf Leben und Sterben des »Urtirolers«. Erstmalig und unverhofft ist damit in die Archäologie eine Form der Alltagsforschung eingekehrt, wie sie etwa für die Mittelalterforschung schon seit langem üblich ist (ab Seite 30).

Akribisch untersuchten die Experten nicht nur die seltsamen Zufälle der Gefriertrockung, der es zu verdanken ist, dass Ötzis Leichnam mit all seinen Habseligkeiten über Jahrtausende im Gletschereis konserviert wurde. Auch seine »Personalien« ermittelten sie mit Details wie aus dem Fahndungscomputer des Bundeskriminalamts: Alter ca. 46 Jahre, Geschlecht männlich, Größe 1,59 Meter, zuletzt wohnhaft: Ventertal/Südtirol. Besondere Kennzeichen: Tätowierungen (57 Striche und 2 Kreuze) an Rücken, Hand- und Fußgelenken, Erfrierungen am linken kleinen Zeh. Letzte Mahlzeit: Einkorn-Getreide, Schlehen, Rothirsch- und Steinbockfleisch. Bekleidung: Lederwams und -hosen, Regen abweisender Grasmantel, festes Schuhwerk aus Bärenleder. Habseligkeiten: Pfeil und Bogen, Feuerzeug, Baumpilzmedizin, Kupferaxt. Hygienezustand: Zähne stark abgeschliffen, zwei Menschenflöhe, keine Läuse. Todeszeitpunkt: Frühsommer vor 5300 Jahren.

FRANK COTHAM / CARTOONBANK, THE NEW YORKER

»Und lasst es so aussehen, als hätte ihn ein Gletscher überrollt«

Rätselhaft bleiben bis heute der Beruf und die genaue Todesart des Alpenwanderers. Ein Schafhirte war er vermutlich nicht. Zur Todesart hatten sich die Medien rasch auf zwei Hypothesen festgelegt: Der Eismann ist eine Fälschung; oder: Er starb auf der Flucht vor seinen Verfolgern. Die Fälschungshypothese hat, wie jede Verschwörungstheorie, auch heute noch ihre Anhänger, wird jedoch von den Fachleuten nicht ernst genommen. Aber auch die Flucht- und Mordthese hält, wie die Forscher in unserem Artikel berichten, nicht stand. Woran starb er dann, an diesem abgelegen Ort? Ötzi, unser Mann aus der Jungsteinzeit, bleibt geheimnisvoll.

INHALT

FORSCHUNG AKTUELL

10 Teilen macht satt
Blauhäher verhalten sich kooperativ, wenn sie den Vorteil direkt sehen können

12 Umschaltbare Oberflächen
Die Benetzbarkeit eines Molekülteppichs lässt sich elektrisch steuern

14 Lochgitter liefert bessere Bilder
Neuartiges Mikroskop enthüllt das Treiben der Biomoleküle in der Zelle

17 Gefrorene Dunkle Energie
Sind Schwarze Löcher erstarrte Sternleichen mit undurchdringlicher Kruste?

21 Gaukler mit sechstem Sinn
Von Schmetterlingen im Regenwald, die auf polarisiertes Licht fliegen

23 Bild des Monats
Auslaufende Eismassen

SPEKTROGRAMM

40 Krebs riechen · Frühling auf Neptun · Schnitzeljagd bei der Waldmaus · Älteste chinesische Schrift · Vulkane speien Brom · Eizellen aus der Petrischale

THEMEN

24 25 Jahre Spektrum der Wissenschaft Teil VII: Die Chemie beherrschen
Genauere Kenntnis des Reaktionsgeschehens ermöglicht gezieltere Synthesen

30 TITELTHEMA: Der Mann aus dem Eis
Neues vom Steinzeitmann Ötzi

42 Mars
Der Rote Planet weist mehr Unterschiede als Gemeinsamkeiten zur Erde auf

52 Champagner
Physikalische Untersuchungen an einem edlen Getränk

58 Pille gegen das Altwerden
Forscher arbeiten an der Verwirklichung eines Menschheitstraums

66 Grid Computing
Eine universelle Software-Struktur macht Rechenleistung problemlos und unverzüglich verfügbar

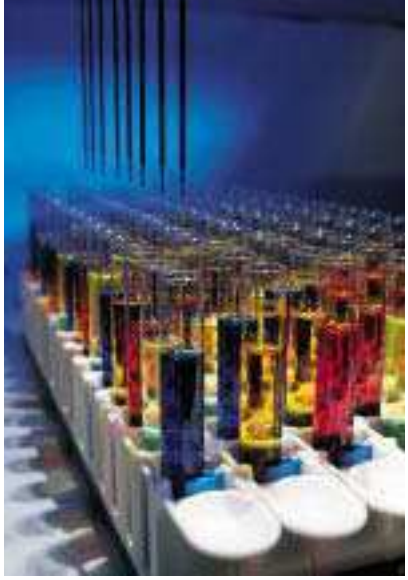
76 Biometrie (Teil I)
Irisscan und Fingerabdruck konkurrieren mit Passwort und Geheimzahl

FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

86 Wenn Fett zur Sucht wird
Die krankhafte Form des Übergewichts erreicht epidemische Ausmaße

Titelbild: Viele Zufälle trafen zusammen, sodass diese Mumie eines Steinzeittirolers am 19. September 1991 aus einem Gletscher ausaperte. Als das Foto entstand, hatten viele Helfer sie bereits weiter freigekratzt.

Bild: Superbild / Zefa



SEITE 24

SERIE »25 JAHRE SPEKTRUM« (VII): CHEMIE

Der Widerspenstigen Zähmung

Vor 25 Jahren ließen sich Chemiker von Erfahrung und Intuition leiten, wenn sie ihre Synthesen entwarfen. Tiefere Einsichten in die elementaren Schritte chemischer Reaktion erlauben heute ein viel gezielteres Vorgehen. Aber auch wahlloses Kombinieren führt manchmal zum Ziel.

SEITE 42

PLANETOLOGIE

Die unirdischen Landschaften des Mars

Der Rote Planet beherbergt vielleicht kein Leben – aber tot ist er dennoch nicht. Seine Oberfläche zeugt von vielfältiger Aktivität.

SEITE 52

SCHAUMBLASEN

Der Charme des Champagners

Einem Sektglas, gefüllt mit prickelndem Schaumwein, gehen auch nüchterne Wissenschaftler gerne auf den Grund.

SEITE 58

PHARMAZEUTIKA

Der steinige Weg zur Anti-Aging-Pille

Ein biblisches Alter erreichen und dabei vital bleiben – hochwertige Schmalkost könnte dazu verhelfen. Forscher suchen nach einer Pille, die den Effekt harter Selbstkasteiung durch Hungern imitiert.

TITELTHEMA: EISMANN

Die Herkunft von Ötzi

SEITE 30

Dem steinzeitlichen Gletschermann aus den Ötztaler Alpen entlocken Forscher immer noch spektakuläre neue Fakten zu Leben und Sterben. Vor allem Pflanzenanalysen kreisen nun seinen letzten Wohnort und den wirklichen Todeszeitpunkt ein.

SEITE 66

GRID COMPUTING

Rechenleistung aus der Steckdose

Wie schön wäre es, wenn man die Leistung eines Computers so problemlos aus dem Netz abzapfen könnte wie Trinkwasser oder elektrischen Strom! Durch »Grid Computing« könnte diese Vision wahr werden.

SEITE 76

REPORT

Biometrie (Teil I)

Ein tiefer Blick ins Auge einer Person fasziniert Informatiker auch beruflich: Wie der Fingerabdruck ist die Struktur jeder Iris einmalig und somit als Merkmal zur Personenerkennung geeignet.

88 Virtuelle Menschen in Echtzeit
Autonom handelnde digitale Geschöpfe werden uns bald im Alltag begleiten

90 Handel mit Emissionsrechten
Ein neuartiges marktwirtschaftliches Instrument soll den Kohlendioxid-Ausstoß reduzieren helfen

REZENSIONEN

94 ▷ **Pinguine – Spezialisten fürs Kalte** von Boris Culik ▷ **Encyclopædia Britannica 2003** von Encyclopædia Britannica Inc. ▷ **Superpox** von Richard Preston ▷ **Luzifers Vermächtnis** von Frank Close ▷ **If the Universe is Teeming with Aliens … Where is Everybody?** von Stephen Webb ▷ **S.E.T.I.** von Tobias Daniel Wabbel (Hg.) ▷ **M. C. Escher's Legacy** von Doris Schattschneider und Michele Emmer (Hg.)

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

106 Der Oberaffe

KOMMENTARE

22 Nachgehakt
Die Crux mit den Zukunftsvisionen

92 Krebsregister am Ende

WISSENSCHAFT IM …

64 Alltag: HighChem gegen Flöhe

83 Rückblick: Batterielose Fernsprecher, Telephon als Operationsbesteck u. a.

84 Unternehmen: Laser für Leser

104 Internet: Tierischer Scharfsinn

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial · 6 Leserbriefe/Impressum · 103 Preisrätsel · 110 Stellenmarkt · 114 Vorschau

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN

Anthropologie und Genetik

Eine geniale Idee hat der Wissenschaft vom Menschen einen geradezu revolutionären Fortschritt beschert: den Stammbaum der Menschen und den der Sprachen gegeneinander abzugleichen.

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

Satellitengelenkte Waffen

April 2003

Moderne Waffen Schwerverletzten erläutern

Man sollte dem Autor einen Dolmetscher zur Verfügung stellen und dann sollte er diesen Artikel als Vortrag in den irakischen Krankenhäusern halten, wo Tausende schwer verletzter und verstümmelter Zivilisten liegen. Er sollte in die Augen der Kinder sehen, die halbverbrannt sind oder denen Arme und Beine amputiert wurden und ihnen erklären, wie zielsicher die Bomben waren, die sie getroffen haben.

Was könnte die Menschheit mit dem Geld, das sie für solche Waffen jedes Jahr ausgibt, Sinnvolles anfangen!

Arne Schönwald, Berlin

U.S. NAVY

Kauf teurer und besserer Waffen rechtfertigen

20 000 Dollar ist noch immer ein stolzer Preis für eine Waffe. Das führt dazu, dass sie nur auf Ziele gefeuert wird, die sich lohnen. Diese finden sich im Allgemeinen nur in der Ebene. Dort sind sie meistens größer und auch einfacher zu lokalisieren als in bergigen Gegenden. Deswegen ziehen Militärs, die solche Waffen haben, Kriege gegen Staaten mit viel Flachland denen gegen gebirgige Länder vor.

Der Irak ist (außer im Norden) recht flach, also lässt sich dort schön Krieg führen, dort sind diese Waffen effektiv. Afghanistan hat nicht viel Flachland, also begnügt man sich dort damit, nur dieses zu halten.

Die Zerstörung des World Trade Center und die Beschädigung des Pentagon wurden von 19 mit Messern bewaffneten und über vier Flugzeuge verteilten Verrückten ausgeführt. Gegen sie hätten keine GPS-Waffen geholfen. Die Militärs und Militärtechniker, die darüber nachdenken sollten, wie man sich dagegen wehrt, konzentrieren sich jedoch auf die Entwicklung von Waffen, deren Nutzen das Ende der Sowjetunion nicht überdauert hat. Man muss sie also loswerden, um zu beweisen, dass ihre teure Anschaffung gerechtfertigt war. Dann kann man sie ja auch wieder neu bauen – und besser.

Peter Leighton-Langer, Bensheim

AUS: U. SEDLAG, WUNDERBARE WELT DER INSEKTEN, URANIA-VERLAG

Beim Absprung des Schnellkäfers gleitet der Zahn des vorderen Brustabschnitts in die Grube (schwarzer Pfeil, oben).

Flöhe, Käfer und Leichtathleten

Physikalische Unterhaltungen, April 2003

Herr Bürger trifft mit seiner Darstellung, dass die Schnellkäfer Kopfschild und Hinterleib »mit einer Muskelfeder« blitzschnell zusammenziehen, nicht ganz den Sachverhalt. Eine genaue Darstellung findet sich in »Wunderbare Welt der Insekten« von Ulrich Sedlag (Urania, Leipzig 1978):

»Während [der Schnellkäfer] ein ›hohles Kreuz‹ macht, rastet ein Zahn des vorderen Brustabschnitts am Vorderrand des folgenden Segments ein. Wird der Zahn ausgelöst, lassen ihn die gespannten starken Muskeln … auf einer spiegelglatten Fläche in die Grube zurückgleiten, in der er normalerweise liegt. Von einer harten Unterlage kann der Käfer dadurch 20 oder 30 cm hochschnellen …«

Ähnliche mechanische Kopplungen wie beim Schnellapparat dieser Käfer, die sich nur mit einem gewissen Kraftaufwand lösen lassen, gibt es in vielen Varianten in unserem Alltag, etwa bei Kettenkugeln von Plastik-Modeschmuck.

Dr. Wilfried Richter, Leipzig

Stroh statt Plastik

Wissenschaft in Unternehmen, März 2003

Die Umweltverträglichkeit eines Produktes hängt nicht nur von der Entsorgungsseite ab, sondern vom gesamten Rohstoff- und Lebenszyklus. Erst eine Ökobilanz erlaubt dazu Aussagen. Für Retrupor liegt eine solche nicht vor. Hier müssten, angefangen vom anteiligen Verbrauch an Dieseltreibstoff, Düngemitteln und Pflanzenschutzmitteln bis zur Strohproduktion, die ökologischen Kosten zur Her-

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg, Sigrid Spies
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Andreas Merkert (stv. Hersteller), Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. (06221) 91 26-711, Fax (06221) 91 26-729
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (02244) 43 03, Fax (02244) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (02 11) 908 33 57, Fax (02 11) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Produktentwicklung: Dr. Carsten Könneker, Tel. (06221) 91 26-770
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. (06221) 91 26-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. (06221) 91 26-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. (06221) 91 26-744
Übersetzer: Dr. med. vet. Christian Epe, Dr. Werner Gans, Dr. Ingrid Horn, Felix Hupfeld, Dr. Olivia Meyer-Streng, Maria Yiallouros.

Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. (06221) 91 26-600, Fax (06221) 91 26-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Leser- und Bestellservice: Tel. (06221) 91 26-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, D-69469 Weinheim, Tel. (06201) 60 61 50, Fax (06201) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Sibylle Roth, Tel. (02 11) 887-23 79, Fax (02 11) 887-23 99; verantwortlich für Anzeigen: Stefan Söht, Postfach 10 26 63, D-40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-23 86, Fax (02 11) 887-28 46
Anzeigenvertretung: Berlin: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, D-10117 Berlin, Tel. (030) 61 68 61 50, Fax (030) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Burchardstraße 17, D-20095 Hamburg, Tel. (040) 30 18 31 94, Fax (040) 33 90 90; Düsseldorf: Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, D-40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 301 35-20 60, Fax (02 11) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Holger Schlitter, Eschersheimer Landstraße 50–54, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. (069) 24 24-45 34, Fax (069) 24 24-45 55; Stuttgart: Norbert Niederhof, Königstraße 20, D-70173 Stuttgart, Tel. (07 11) 22 475-40, Fax (07 11) 22 475-49; München: Reinold Kassel, Bernd Schmetje, Josephspitalstraße 15, D-80331 München, Tel. (089) 54 59 07-12, Fax (089) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-23 87, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 24 vom 01.01.2003.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen
© Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, D-69038 Heidelberg.
Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werkes, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werkes berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatzgegen den oder die jeweiligen Nutzer. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.
ISSN 0170-2971
SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber,

stellung der für Retrupor erforderlichen Fungizide, die Aufwendungen für die Aufbereitung von Cellulose aus Altpapier, die ökologischen Prozesskosten sowie Transport, Produktion und Einsatz von Naturkautschuk ermittelt und auf ein definiertes Verpackungspolster bezogen werden. Erst wenn die daraus resultierende ökologische Belastung günstiger wäre als die aus der Verwendung eines zum gleichen Zweck eingesetzten Styroporpolsters, könnte von ökologischem Vorteil gesprochen werden.

Haimo Emmingen, EPSY GmbH, Bad Homburg

Antwort des Autors:

Es ist unzweifelhaft, dass Kunststoffe in unserem Alltag einen wichtigen Platz einnehmen. Dennoch muss man fragen dürfen, wo sich Alternativen anbieten. Wir sollten uns erstens nicht auf Bewährtem und Althergebrachtem ausruhen und zweitens muss die Frage nach den Rohstoffen erlaubt sein. Es geht nämlich sowohl um deren Begrenztheit als auch um die beim Verbrennen entstehende CO_2-Emission. Erstere wird nach Meinung von Zukunftsforschern alle Diskussionen um Lebensweg- oder Ökobilanzen zukünftig in den Hintergrund drängen. Nachwachsende Rohstoffe, zumal wenn sie aus heimischen Gefilden stammen, haben da unzweifelhaft einen Bonus, selbst wenn die eigentliche Ökobilanz, wie sie von einem Umweltinstitut oder Ingenieurbüro in hochkomplexen Berechnungsmodellen erstellt wird, auf den ersten Blick gar nicht so positiv ausfallen mag.

Aber selbst das ist im Fall von Retrupor nicht gesagt, denn eine solche Ökobilanz ist derzeit noch in Arbeit. Nach bisherigem Kenntnisstand bestehen die Rohstoffe für Retrupor weitgehend aus bisher ungenutzten Reststoffen, für die keinerlei zusätzliche Fungizide eingesetzt werden.

Martin Boeckh

Schlote, die Schlamm statt Feuer speien

Januar 2003

Hierzu möchte ich ergänzen, dass in Rumänien, im Karpatenknie, oberhalb von Bucao, ein ähnliches Gebiet besteht, das schon den Römern bekannt gewesen ist. In einer Höhe von etwa 1000 m im Gebirge befindet sich eine unbewachsene Fläche aus grauem Ton von ca. 100 × 200 m Durchmesser. Innerhalb dieses Gebietes finden sich mehrere (ca. zehn) verschieden hohe »Vulkankegel« von 30 bis 50 cm Höhe, aus denen in regelmäßigen Abständen eruptionsweise graue Blasen aufsteigen, die an der Oberfläche zerplatzen.

Das Wasser dieser Blasen sammelt sich auf der schiefen Fläche zu einem kleinen Bach, der in einem weißlich kristallinen Bett abfließt, während der Ton die kleinen Kegel bildet. Die aufsteigenden Blasen sind höchstens handwarm. Da die Gebirgsgegend sehr regenreich ist, ist davon auszugehen, dass die Kegel durch die Niederschläge abgetragen werden, sodass ihre Höhe sich kaum verändert.

Dr. Wolfgang Duncker, Bernau

Gladiatoren: Gespenstische Räuber

Februar 2003

Das Erscheinen des Artikels über die kürzlich entdeckte Gruppe der »Gladiatoren« ist sehr zu begrüßen. Er lenkt den Blick auf eine naturwissenschaftliche Disziplin, die in der öffentlichen Wahrnehmung eher ein Schattendasein fristet. Indem er auf die Zufälligkeit der Entdeckung der neuen Insektenarten hinweist, beleuchtet er zugleich das Dilemma der Systematik und Taxonomie artenreicher Tiergruppen: den eklatanten Mangel an Kennern der Materie.

Der spektakuläre Anlass des Artikels ist die Aufstellung einer neuen Insektenordnung. Ihre Berechtigung soll hier nicht bestritten werden – ihre im Text gebotene Begründung scheint mir jedoch nicht überzeugend. Es wird vor allem auf die Mixtur äußerer Merkmale hingewiesen, welche einzeln oder in anderer Kombination auch bei benachbarten Ordnungen auftreten. Beim Vergleich mit einer der großen Insektenordnungen, den Käfern, findet man dort die meisten zur Differenzierung der neuen Ordnung der Gladiatoren angeführten Merkmale bereits bei der nächstniedrigeren Kategorie, d. h. im Rahmen von Familien, vereinigt.

Die Spektrum-Leser sind durchaus schwere Kost gewohnt – ich meine, sie hätten eine anspruchsvollere Begründung der neuen Insektenordnung erwarten können (falls es sie gibt).

Dr. Horst Kippenberg, Herzogenaurach

PETER CLIFT, WOODS HOLE OCEANOGRAPHIC INSTITUTION

Zu den eindrucksvollsten Schlammvulkanen gehört der Chandra Gup in Pakistan.

Sinkende Impfbereitschaft

Leserbriefe, Mai 2003

Herrn Lange ist in einigen Punkten durchaus zuzustimmen, nicht aber bei der Verwechslung einer »Erkältung« mit einer echten Grippe. Und da Herr Breuer in seinen Ausführungen vornehmlich diese Krankheit im Auge hatte, muss man ihm hier unbedingt Recht geben. Die Grippeschutzimpfung wird durchweg gut vertragen, von wenigen Ausnahmefällen abgesehen. Im Interesse der Allgemeinheit wäre eine möglichst hohe Impfbeteiligung zu wünschen. Nur auf diese Weise besteht die Aussicht, gegebenenfalls eine Epidemie, die mit Sicherheit zahlreiche Todesopfer forderte, zu verhüten.

Dr. Karl Mertlich, Meckenheim

VERHALTENSFORSCHUNG

Teilen macht satt

Normalerweise fehlt Tieren der Sinn für den möglichen künftigen Nutzen selbstlosen Verhaltens. Doch nun erwiesen sich Vögel im Test als uneigennützig, wenn der sich füllende Futternapf ihnen augenfällig vorführte, wie sich momentaner Verzicht langfristig auszahlt.

Von Nardine Löser

Die Schlange vor der Kasse im Supermarkt scheint endlos. Genervt quälen wir uns mit unserem randvollen Einkaufswagen millimeterweise vorwärts – und sind über uns selbst erstaunt, dass wir einen drängelnden Studenten vorlassen. Immerhin klemmt nur Milch und Toastbrot unter seinem Arm. Was bewegt uns zu diesem selbstlosen Akt? Ist es schiere Großmut oder »Auf den kommt es nun auch nicht mehr an«? Oder steckt Weitblick dahinter, der uns ahnen lässt, dass wir schon morgen ebenfalls für einen Gefallen dankbar sein könnten?

Auf den ersten Blick steht Altruismus in klarem Widerspruch zu den Forderungen des Darwin'schen Kampfes ums Dasein. Und doch spielt Geben und Nehmen eine zentrale Rolle im menschlichen Miteinander. Schon seit den frühen 1950er Jahren widmen sich Verhaltensforscher und Soziobiologen daher der Frage, wie unter den Bedingungen evolutiven Wettbewerbs kooperatives Verhalten entstehen konnte.

Antworten ergaben sich aus Experimenten mit spieltheoretischen Modellen wie dem berühmten Gefangenendilemma. Dabei haben zwei Personen die Wahl zwischen Kooperation oder Im-Stich-Lassen. Für beide zusammen ist der Gewinn am größten, wenn sie gemeinsame Sache machen; doch jeder einzelne erreicht für sich allein den höchstmöglichen Profit, wenn er sich gegen den Partner stellt, während dieser kooperiert. Treffen zwei Egoisten aufeinander, gehen beide leer aus. Bei Experimenten mit Menschen mündete dieses Spiel in eine dauerhafte Kooperation, wenn einer der Teilnehmer nach dem Prinzip des »Wie du mir – so ich dir« (englisch »Tit for Tat«) Gleiches mit Gleichem vergalt.

Ganz anders sieht es bei Tieren aus. Hier gibt es Kooperation gewöhnlich nur innerhalb der Verwandtschaft, wo sie die Verbreitung der eigenen Gene fördert. So betreuen bei Affen weibliche Familienangehörige die Nachkommen gemeinsam, und Löwinnen eines Rudels – überwiegend Schwestern oder Mütter und Töchter – unterstützen sich bei der Jagd. Dagegen lassen sich nicht verwandte Tiere in spieltheoretischen Experimenten auch durch eine Tit-for-Tat-Strategie nicht dazu bewegen, auf eine unmittelbare Belohnung im Interesse einer für beide Partner günstigen langfristigen Kooperation zu verzichten.

Die Erklärung liegt auf der Hand: Vorläufiger Verzicht setzt einen Sinn für den künftigen Nutzen voraus. Der aber scheint Tieren zu fehlen: Sie schauen kurzsichtig stets nur auf ihren unmittelbaren Vorteil. Dafür sprechen auch Ergebnisse von Versuchen, bei denen Tiere zwischen einer sofortigen und einer verzögerten Futterprämie wählen konnten. Dabei zogen sie generell die unmittelbare Entlohnung vor, auch wenn das hinausgeschobene Honorar größer war.

Vögel im Gefangenendilemma

Angesichts dieser Erfahrung fragten sich David W. Stephens und seine Kollegen an der Universität von Minnesota in St. Paul, ob Tiere vielleicht dann zu langfristiger Kooperation fähig sind, wenn man dafür sorgt, dass sich das kurzsichtige Schielen auf den direkten Vorteil nicht mehr auszahlt. Das lässt sich im Prinzip leicht erreichen – beispielsweise dadurch, dass es die Belohnung nicht sofort nach jeder Runde, sondern erst gesammelt am Ende des Versuchs gibt. Entsprechende Experi-

JUSTIN PIEHOWSKI

Kooperation im Test: Im zweigeteilten Versuchskäfig sind die beiden Blauhäher in ihrer hinteren Ausgangsposition (im Bild oben) durch eine Sichtblende getrennt. Durch Lichtreize stimuliert, hüpfen sie auf eine der zwei vorderen Stangen. Die Wahl der inneren Stange gilt als Kooperieren, die der äußeren als Im-Stich-Lassen. Vom wechselseitigen Verhalten der Vögel hängt die Anzahl der Körner ab. Diese fallen entweder in die Schale zwischen den Stangen oder sammeln sich zunächst in dem transparenten Behälter darüber. Nur bei verzögerter Ausschüttung entwickelte sich Kooperation.

Die in Nordamerika beheimateten Blauhäher sind klug genug zu erkennen, dass sich kurzfristiger Verzicht im Interesse einer langfristigen Kooperation lohnen kann.

DON DES JARDIN, HALIFAX

mente führten die US-Wissenschaftler mit Blauhähern *(Cyanocitta cristata)* durch, die im östlichen Nordamerika beheimatet sind und zur Familie der Rabenvögel gehören – durchweg klugen, neugierigen und anpassungsfähigen Tieren *(Science, Bd. 298, S. 2216)*.

Zunächst schufen die Forscher eine Situation wie beim üblichen Gefangenendilemma. Dazu setzten sie zwei Blauhäher in einen Käfig, in dessen hinterem Teil eine Sichtblende jeden Blickkontakt verhinderte. Lichtreize veranlassten die Vögel dann, nach vorne zu hüpfen. Dort hatten sie die Wahl zwischen zwei Stangen, von denen aus sie nun auch den Partner sehen konnten. Hüpfen auf die nahe am Nachbarvogel angebrachte innere Stange wurde dabei als Kooperation gewertet. Zog der Häher dagegen den äußeren Platz vor, galt das als »Im-Stich-Lassen«.

Die Belohnung folgte den gängigen Regeln des Gefangenendilemmas: Hüpften beide Vögel auf die inneren Stangen, erhielt jeder eine ordentliche Futterration. Noch mehr Körner gab es aber für den, der die äußere Stange wählte, während der Partner sich auf die innere setzte. Der derart Betrogene hatte dann das Nachsehen. Wenn beide Vögel auf Abstand gingen, schauten sie gemeinsam in die Röhre.

Dieses Spiel wurde mit ein und demselben Paar mehrmals wiederholt. Dabei manipulierten die Forscher das Verhalten eines der beiden Häher durch entsprechende Lichtreize derart, dass er seinen Partner entweder permanent hinterging oder aber die Tit-for-Tat-Strategie verfolgte, das heißt beim ersten Mal kooperierte und dann stets das Verhalten des anderen Vogels beim vorherigen Durchgang nachmachte. Dabei bestätigten sich die Ergebnisse ähnlicher früherer Versuche mit anderen Tieren: Zwar rief das »Wie du mir – so ich dir« etwas höhere Kooperationsraten hervor, konnte aber die generelle Tendenz, den kurzfristigen eigenen Vorteil zu suchen, nicht dauerhaft brechen.

Nach diesem Vorversuch kamen die Wissenschaftler zu ihrem eigentlichen Test: dem Spiel mit verzögerter Gewinnausschüttung. Dabei erhielten die Vögel das Futter nicht sofort. Es sammelte sich vielmehr in einem Behälter an und wurde erst nach vier Durchgängen zugänglich gemacht. Damit die Häher auch verfolgen konnten, wie die Belohnung von Runde zu Runde wuchs, war der Sammelbehälter durchsichtig.

Verzögerte Belohnung macht kooperativ

Und siehe da – die Vögel kooperierten. Nachdem das Im-Stich-Lassen nicht mehr kurzfristig belohnt, sondern in der Summe der vier Durchgänge bestraft wurde, begriffen sie offenbar schnell, dass Kooperieren die günstigere Option war: Wenn der eine Partner eine Tit-for-Tat-Strategie verfolgte, entwickelte sich wie bei entsprechenden Experimenten mit Menschen meist auf Dauer eine hohe Kooperationsrate. Damit scheint bewiesen, dass die Vögel die Versuchsstrategie und den Zusammenhang zwischen ihrem gemeinsamen Verhalten und der daraus resultierenden Belohnung verstanden.

Auch nicht verwandte Tiere können also unter bestimmten Bedingungen ihren plumpen Egoismus überwinden und sich kooperativ verhalten. Nötig ist nur, dass der Nutzen für sie erkennbar wird. Das scheint dann der Fall zu sein, wenn sie ihre künftige Belohnung vor Augen und einen vertrauenswürdigen Partner haben, der sie nicht grundlos hintergeht.

Allerdings funktionierte der Versuch nicht bei allen Blauhäherpaaren. Deshalb bleibt offen, ob nicht vielleicht individuelle Unterschiede in der Neigung zur Kooperation existierten. So könnten Geschlecht und gegenseitiger Bekanntheitsgrad der Vögel eine Rolle gespielt haben. Solche Faktoren wirken sich ja auch auf die menschliche Kooperation aus.

Und so erhebt sich die Frage: War es in Wahrheit also doch nur das sympathische Lächeln, das uns bewogen hat, den Studenten vorzulassen? ◁

Nardine Löser ist Diplombiologin und Wissenschaftsjournalistin in Berlin.

MATERIALFORSCHUNG

Umschaltbare Oberflächen

Ein molekularer Teppich, dessen Eigenschaften sich über ein elektrisches Feld steuern lassen, könnte als Schnittstelle zwischen Biologie und Elektronik fungieren.

Von Michael Groß

Grenzflächen mit besonderen Eigenschaften spielen auf vielen Gebieten eine wichtige Rolle. Ihr Einsatzspektrum reicht vom Abgaskatalysator zum Badeschaum, vom Kleben bis zu biochemischen Trennmethoden. Materialforscher haben daher in jüngster Zeit viel Mühe in die Entwicklung neuartiger Oberflächen gesteckt. Deren Eigenschaften werden oft schon auf molekularer Ebene entworfen und festgelegt. Beispielsweise können sie in vorgegebenen Mustern wechseln, wobei die räumliche Präzision der Musterbildung inzwischen auf den Größenbereich von hundert Nanometern (millionstel Millimetern) zusteuert. Allerdings galt bisher: War eine solche molekulare Oberfläche erst einmal hergestellt, blieben ihre Eigenschaften unveränderlich.

Doch das muss nicht so sein. Joerg Lahann, Postdoktorand bei Thomas Langer am Massachusetts Institute of Technology (MIT), entwickelte die Idee einer Oberfläche mit umschaltbaren Molekülen. Ausgangspunkt war ein früheres Projekt, bei dem dieselbe Arbeitsgruppe Polymere mit einem Formgedächtnis erzeugt hatte (Spektrum der Wissenschaft 5/2001, S. 27). Diese Kunststoffe lassen sich durch Änderung der Temperatur zwischen zwei verschiedenen geometrischen Formen umschalten und ähneln darin den schon länger bekannten gestalterinnernden Metall-Legierungen. Im Unterschied zu diesen sind sie allerdings biologisch abbaubar, was sie insbesondere für die Medizin attraktiv macht.

Lahann fragte sich, was geschähe, wenn man eine Oberfläche mit solchen Molekülen beschichten würde. Ließen sich dann die chemischen Eigenschaften gleichfalls »auf Knopfdruck« verändern?

Bei seinen Versuchen ging der MIT-Forscher von einem mittlerweile klassischen System der Grenzflächentechnik aus: einer sich selbst zusammenbauenden monomolekularen Schicht (SAM für *self-assembling monolayer*). Dabei ordnen sich fadenartige Moleküle parallel nebeneinander auf einer Unterlage an – zum Beispiel einer dünnen Goldfolie. Zur Anbindung an das Metall kann eine SH-Gruppe (aus einem Schwefel- und einem Wasserstoffatom) dienen, die an einem Ende eines langkettigen Kohlenwasserstoffs (Alkans) angebracht wird. Die Goldschicht muss nicht einmal besonders rein sein. Zudem lassen sich mit einem Stempel leicht Muster aus verschiedenen Molekülarten im Mikrometermaßstab aufbringen (Spektrum der Wissenschaft 8/1994, S. 23).

Allerdings sind in einer solchen monomolekularen Schicht die Moleküle dicht gepackt wie die Wollfäden in einem Berberteppich und demnach alle parallel ausgerichtet. Individuelle Bewegungsfreiheit verbleibt ihnen nicht – und damit auch kein Spielraum für eventuelle Gestaltänderungen. Lahann verfiel deshalb auf einen Trick, die Distanz zwischen ihnen zu vergrößern: Er knüpfte seinen Molekülteppich mit Fäden, die am äußeren Ende eine sperrige Atomgruppe als Abstandshalter trugen *(Science, Bd. 299, S. 371)*. Wie die Bäume in einem Obstgarten waren die Moleküle dann so weiträumig angeordnet, dass jedem einzelnen genügend Platz für die Krone blieb.

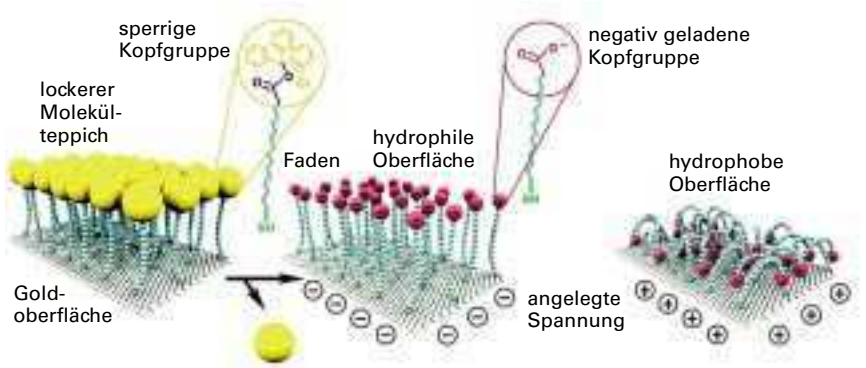
Die sperrige Gruppe war aber nur über eine leicht spaltbare Esterbindung mit dem Stamm verknüpft, sodass Lahann die Fäden mit einer einfachen chemischen Reaktion auf einen Schlag enthaupten konnte. Die zurückbleibenden Rumpfmoleküle hatten nun reichlich Bewegungsfreiheit. Als Folge der Esterspaltung trugen sie außerdem an der von der Goldfolie abgewandten Seite eine negative elektrische Ladung.

Moleküle, die sich artig verbeugen

Dieser locker geknüpfte Molekülteppich war zwar nicht wie die Formgedächtnis-Polymere durch Temperaturänderung zwischen verschiedenen Anordnungen schaltbar. Aber dank der geladenen Enden boten sich die Fäden für Manipulationen mit elektrischen Feldern an.

Im Normalfall sollten sie wie in den dicht gedrängten Monoschichten lang gestreckt vorliegen, weil diese Anordnung energetisch am günstigsten ist. Obwohl die Kohlenwasserstoffketten eigentlich wassermeidend (hydrophob) sind, präsentieren sie in diesem Fall einer benetzenden Lösung eine Oberfläche, die sich wegen der elektrisch geladenen Endgruppe relativ wasserliebend (hydrophil) gibt.

Legt man hingegen eine Spannung mit positivem Pol an der Goldfolie an, zieht sie die negativ geladenen Kopfgruppen nach unten: Die Moleküle verbeugen sich gleichsam. Der Außenwelt kehren sie jetzt ihren verlängerten Rücken zu – also die ausgeprägt hydrophobe Flanke der gebogenen Kohlenwasserstoffkette. Polt man die Spannung um, werden die geladenen Köpfe abgestoßen, und die Fäden sollten sich wieder aufrichten. ▷



R. LANGER ET AL., SCIENCE, BD. 299, S. 371

Kohlenwasserstoffketten mit einer sperrigen Kopfgruppe ordnen sich locker auf einer Goldoberfläche an (links). Nach dem Abspalten der Gruppe (Mitte) tragen sie am Ende eine negative Ladung und bilden so eine wasserliebende Oberfläche. Wird das Metall positiv aufgeladen, biegen sich die Ketten jedoch zu ihm hin und präsentieren ihr wassermeidendes Mittelstück nach außen (rechts). Die Oberfläche wird dadurch hydrophob.

Mit verschiedenen Methoden bewiesen die MIT-Forscher, dass sich die Moleküle wirklich in der geschilderten Weise verhalten. Zum Beispiel ermittelten sie die Benetzbarkeit der Oberfläche durch Wasser, indem sie den Randwinkel aufgesprühter Wassertröpfchen maßen. Dabei fanden sie über viele Umpolungen des elektrischen Feldes hinweg immer wieder denselben Wechsel zwischen einem stark wasserabweisenden Zustand bei positiver und einem weniger hydrophoben bei negativer Ladung der Goldfolie.

Das Verbeugen und Aufrichten der Moleküle war aber auch direkt nachweisbar: mit einer Methode, die empfindlich auf Änderungen der Molekülstruktur an Grenzflächen reagiert. Es handelt sich um die SFG-Spektroskopie (für *sum frequency generation*), eine Abwandlung der Infrarot-Spektroskopie, die Schwingungen der Atome in einem Molekül misst.

Obwohl sich also der Umschalteffekt mit beiden Methoden eindeutig und reproduzierbar beobachten ließ, handelt es sich noch nicht um einen Wechsel zwischen Zuständen mit völlig entgegengesetzten Eigenschaften, sondern eher um eine graduelle Änderung. Selbst bei gestreckten Molekülen verhält sich die Oberfläche nämlich nur mäßig wasserfreundlich.

Dies mag damit zusammenhängen, dass die Fäden lediglich an ihrem äußersten Ende hydrophil sind und bei der lockeren Anordnung in gewissem Ausmaß auch ihr hydrophobes Inneres präsentieren. Möglicherweise kann man sie mit einem definierten Gelenk versehen, das sie nur in einer Richtung umknicken lässt, sodass nicht nach allen Seiten hin Platz freigehalten werden muss. Sie könnten dann zum Beispiel dicht gedrängt in geraden Reihen stehen und sich wie das Theaterensemble am Ende des Stücks alle parallel verbeugen.

Mit solchen Verbesserungen dürften die schaltbaren Molekülflächen im Grenzbereich zwischen Biochemie, Nanotechnologie und Elektronik schon bald Marktnischen finden. Einige Analysemethoden stehen heute kurz davor, auf Einzelmoleküle anwendbar zu sein. So hofft man, demnächst die Buchstabenfolge eines Gens aus einem einzigen DNA-Doppelstrang ablesen zu können. Mit monomolekularen Oberflächen, deren Eigenschaften elektronisch steuerbar sind, ließen sich die Biomoleküle in die richtigen Bahnen für diese Analyse lenken.

Im medizinischen Bereich bieten sich die schaltbaren Moleküle für miniaturisierte Wirkstoffdosierer an, die man zum Beispiel bei größeren Operationen dem Patienten implantiert, damit sie über Monate hinweg die medikamentöse Nachbehandlung übernehmen. Solche »Pharmachips« gehen ebenfalls auf Arbeiten aus Langers Team zurück und werden derzeit bei der Firma MicroChips in Bedford (Massachusetts) zur Marktreife entwickelt. Das elektronische Umschalten einer Molekülschicht könnte den gebundenen Wirkstoff freisetzen oder aber die Ausgangskanäle des gesamten Chips öffnen und schließen, ohne dass mechanisch bewegte Teile benötigt würden.

Die Unterscheidung zwischen hydrophob und hydrophil ist für Biomoleküle ebenso fundamental wie die elektrische Ladung für die Elektronik. Insofern bildet die schaltbare Monoschicht eine willkommene Brücke zwischen beiden Welten: eine Art Modem für den Informationstransfer an der Grenzfläche zwischen Biologie und Elektronik.

Michael Groß ist promovierter Biochemiker und als Wissenschaftsjournalist mit dem Birkbeck College in London verbunden.

MIKROSKOPIE

Lochgitter liefert bessere Bilder

Zu beobachten, was Moleküle in der Zelle miteinander treiben, ist ein Wunschtraum von Biologen. Ein neues Mikroskop lässt ihn nun teilweise wahr werden.

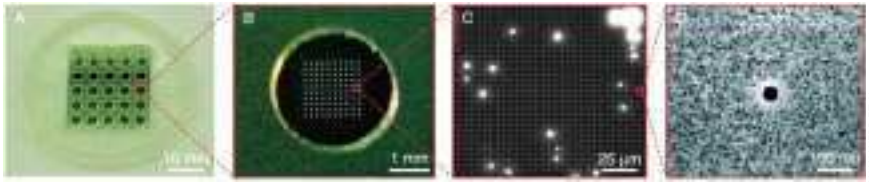
Von Stefan Maier

Auf den ersten Blick ist an dem Lichtmikroskop im Labor von Watt W. Webb an der Cornell-Universität in Ithaca (US-Bundesstaat New York) nichts Besonderes zu entdecken: ein Objekttisch, darunter ein Objektiv, durch das ein Laser eine auf dem Tisch liegende Probe beleuchten kann, das Ganze umgeben von leistungsstarken Detektoren. Und doch ist dieses Mikroskop einzigartig: Mit ihm lässt sich die Bewegung einzelner Moleküle sichtbar machen, selbst wenn diese in hochkonzentrierter Lösung vorliegen *(Science, Bd. 299, S. 682)*.

Bisher gelingt das nur in verdünnten Lösungen. Auch dazu bedarf es allerdings eines Tricks. Da selbst relativ große Moleküle – wie Enzyme oder Abschnitte der Erbsubstanz DNA – wesentlich kleiner sind als die Wellenlänge von normalem Licht, kann man sie grundsätzlich nicht scharf abbilden – nicht einmal mit den besten Objektiven; das so genannte Beugungslimit verhindert die dafür nötige Vergrößerung. Um die Moleküle dennoch »sehen« zu können, kleben ihnen Forscher ein fluoreszierendes Etikett an. Dieses leuchtet auf, sobald ein Laserstrahl darauf fällt. Die Fluoreszenz ist zwar viel schwächer als das anregende Laserlicht. Aber sie hat eine andere Farbe, sodass sie durch Filter abgetrennt werden kann. Auf diese Weise lässt sich der Aufenthaltsort eines etikettierten Biomoleküls in einer Lösung bestimmen.

Voraussetzung ist freilich, dass sich nicht mehr als ein solches Molekül im Lichtkegel des Laserstrahls befindet. Und an dieser Stelle macht das Beugungslimit wieder Ärger. Da ein Lichtfleck nämlich nicht viel schmaler als die halbe Wellen-

Ein Deckglas mit einem dünnen, perforierten Überzug aus Aluminium verhilft zu hoher Auflösung. Wie die nach rechts zunehmenden Vergrößerungen zeigen, enthält die Metallschicht in jeder runden Vertiefung 90 000 extrem feine Löcher in gitterförmiger Anordnung.



W. W. WEBB ET AL., SCIENCE, BD. 299, S. 684

▷ länge des betreffenden Lichts sein darf, kann ein Laserstrahl nicht auf einen beliebig kleinen Raumbereich fokussiert werden. Im Fall von grünem Licht entspricht das kleinstmögliche Volumen einem Würfel mit einer Kantenlänge von einem viertel Mikrometer. Bei den Konzentrationen, in denen Biomoleküle üblicherweise in Zellen vorliegen, enthält ein solcher Würfel aber mindestens tausend von ihnen. Deren Fluoreszenzlicht überlagert sich, und sie können nicht voneinander unterschieden werden.

Den Biologen blieb bisher nur ein Ausweg aus diesem Dilemma: Sie mussten die Konzentration ihrer Untersuchungsobjekte künstlich auf weniger als ein Tausendstel verringern. Doch in dieser Verdünnung verhalten sich viele Biomoleküle völlig anders als in ihrer natürlichen Umgebung. Sie sind nun zu weit voneinander entfernt, um interagieren zu können. Genau auf solchen Wechselwirkungen beruht aber das Funktionieren der Zelle. Ihnen gilt daher auch das Interesse von Biologen oder Pharmakologen, die zum Beispiel die Anlagerung einer Substanz an ein Enzym beobachten wollen, um Ideen zur Entwicklung eines neuen Medikaments zu erhalten. Dazu müssen sie aber das Verhalten von Molekülen in natürlichen Konzentrationen verfolgen können.

Lokalisierung einzelner Moleküle mit Lichtblitzen

Genau dieses Kunststück bringt Webb mit seinem neuartigen Mikroskop auf überraschend einfache Weise fertig. Er benutzt dazu ein Deckglas, wie es zur Standardausrüstung jedes Biologielabors gehört. Es enthält kleine runde Vertiefungen, die das Aufpipettieren der Lösung erleichtern, in der die Moleküle schwimmen. Webbs Deckglas hat allerdings eine entscheidende Besonderheit. Es ist mit einem hauchdünnen Aluminiumfilm überzogen, in den mit lithografischen Verfahren der Halbleiterindustrie Hunderttausende winzig kleiner Löcher eingeätzt wurden – 90 000 pro Mulde.

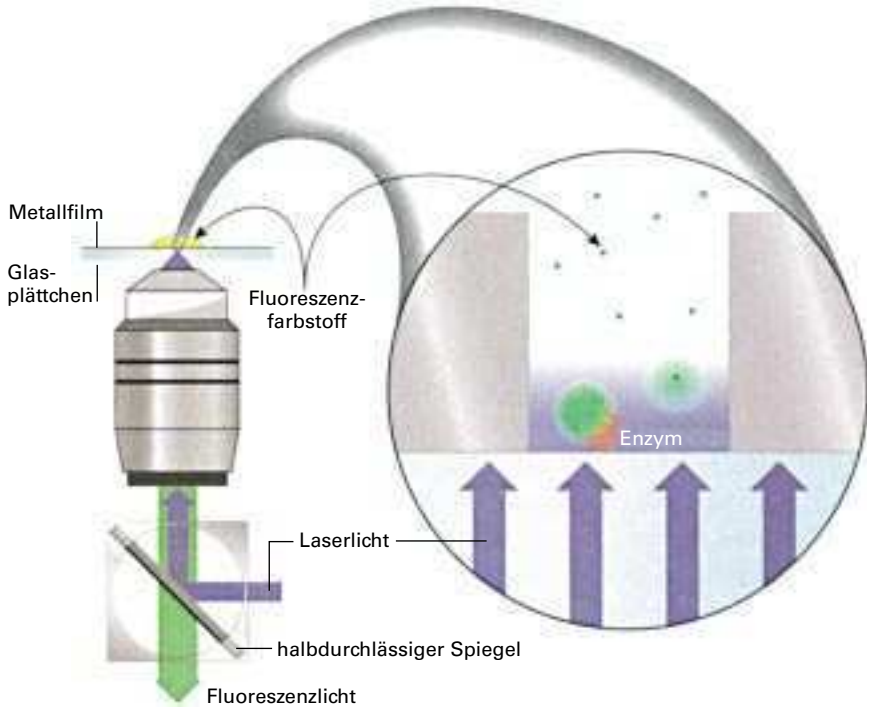
Diese Löcher sind in einem quadratischen Gitter angeordnet und haben Durchmesser von nur wenigen Dutzend Nanometern. Damit sind sie zu klein, um Licht durchzulassen. Wenn man das Deckgläschen von unten beleuchtet, wird die Strahlung deshalb reflektiert. Ein Teil dringt aber zumindest ein Stück weit in die Löcher ein. Obwohl die Intensität des eingedrungenen »evaneszenten« Lichts innerhalb von wenigen Dutzend Nanometern exponentiell auf null abfällt, beherbergt jedes Loch dadurch eine endliche Lichtmenge. Deren Volumen aber ist viel kleiner als die vom Beugungslimit vorgeschriebene Mindestgröße – es beträgt weniger als den hunderttausendsten Teil davon!

Die Lichtflecke in den Löchern sind damit so winzig, dass die Forscher nun einzelne Moleküle in hunderttausendmal höheren Konzentrationen beobachten können als bisher. Der Ablauf der Experimente unterscheidet sich dabei nicht von herkömmlichen Untersuchungen mit normalen Deckgläsern.

Zuerst wird die Probelösung in eine der Vertiefungen pipettiert. Dort schwirren dann die zu untersuchenden Moleküle mit ihren Fluoreszenzfarbstoff-Etiketten auf Grund von Wärmebewegungen ziellos umher. Dabei gerät eines von ihnen ab und zu einmal in ein Loch in der Aluminiumschicht am Boden. Im dortigen hoch konzentrierten Lichtfeld leuchtet sein Etikett dann als heller Lichtblitz auf. Eine Mikrosekunde später ist es allerdings schon wieder aufgetaucht und somit verschwunden. Indem die Wissenschaftler die zahlreichen Lichtblitze auf dem Deckglas beobachten und orten, können sie mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung für viele einzelne Moleküle zugleich verfolgen, wie diese durch die verschiedenen Löcher wandern.

Auf die geschilderte Weise gelang es Webb und seinem Team schon in einem ersten Test, die schwache Wechselwirkung zwischen zwei Molekülen nachzuweisen. Für die Probe aufs Exempel wählten die Forscher die Bindung von Nucleotiden – den Bausteinen der DNA – an die DNA-Polymerase. Dieses Enzym schnappt sich passende Nucleotide aus seiner Umgebung und baut sie nacheinander in einen wachsenden DNA-Strang ein. Mit einem chemischen Trick befestigten die Wissenschaftler die Polymerase am Boden der Löcher im Aluminiumfilm ihres Deckgläschens. Dann brachten sie eine Lösung mit fluoreszenzmarkierten Nucleotiden auf und betrachteten das Geschehen durch das Mikroskop.

Wenn die Nucleotide bei ihrer Bewegung in der Flüssigkeit durch die Löcher wanderten, leuchteten sie, wie erwartet, mehrere Mikrosekunden lang auf. Allerdings beobachteten die Forscher auch einige Lichtblitze, die tausendmal länger anhielten. In diesen Fällen hatte sich das betreffende Nucleotid offenbar an das Enzym gebunden und tauchte deshalb nicht wieder auf. Dass das Leuchten dennoch nach einigen Millisekunden erlosch, liegt an der relativ hohen Lichtstärke in den Löchern: Sie lässt den Fluoreszenzfarbstoff mit der Zeit ausbleichen.



W.W. WEBB ET AL., SCIENCE BD. 299, S. 683

Das Laserlicht wird am Metallfilm reflektiert, dringt aber als evaneszente Welle ein kleines Stück weit in die winzigen Löcher vor. Enzyme mit Fluoreszenzfarbstoff-Etikett leuchten daher auf, wenn sie an den Boden eines Lochs geraten, und geben so ihre Position preis.

Somit gelang es erstmals, die schwache Wechselwirkung zweier Moleküle in konzentrierter Lösung direkt zu beobachten. Trotz dieses beachtlichen Fortschritts weisen allerdings auch die Deckgläser mit der durchlöcherten Aluminiumschicht noch einige Unzulänglichkeiten und Beschränkungen auf. Zum Beispiel eignen sie sich nicht zur Untersuchung ganzer Zellen – diese sind schlicht zu groß und passen nicht in die Löcher hinein. Auch der Metallfilm selbst wirkt störend, da er die Fluoreszenz von Molekülen unterdrücken kann, wenn sie ihm zu nahe kommen. Immerhin aber lassen sich die Deckgläschen problemlos in verschiedene Mikroskope oder andere optische Untersuchungsgeräte integrieren. Als Nächstes will Webb versuchen, damit die genetische Information von einzelnen DNA-Strängen direkt abzulesen. ◁

Stefan Maier ist promovierter Physiker und arbeitet am California Institute of Technology in Pasadena.

ASTROPHYSIK

Gefrorene Dunkle Energie

Nach einer spekulativen neuen Theorie sind Schwarze Löcher nicht alles verschlingende Abgründe, sondern erstarrte Sternleichen mit undurchdringlicher Kruste.

Von George Musser

Sie zermalmen Sterne, lösen Strahlenblitze höchster Energie aus, zerreißen das Gewebe der Raumzeit: Kein Wunder, dass Schwarze Löcher die Fantasie anregen wie die Hauptattraktion einer kosmischen Monstrositätenschau. Ohne sie wären gewisse besonders spektakuläre Himmelsphänomene schlicht unerklärlich. Andererseits sind Schwarze Löcher so extreme Gebilde, dass eigentlich niemand ihre wahre Natur kennt.

Die meisten Forscher denken dabei an mikroskopische Nadelstiche im Raumzeit-Kontinuum: punktförmige Überbleibsel von Sternen, die unter ihrem eigenen Gewicht kollabiert sind. Doch in den letzten Jahren haben einige Theoretiker eine völlig andere Vorstellung von diesen ungewöhnlichen Objekten entwickelt. Danach handelt es sich in Wahrheit um räumlich ausgedehnte Gebilde aus exotischer Materie, die beim Kollaps ähnlich gefriert wie eine Flüssigkeit, die zu Eis erstarrt. Diese provokante Idee eröffnet einen unerwarteten Zugang zur Quantengravitation – zu der noch immer ausstehenden Verschmelzung von Quantenmechanik und Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie.

Den Lehrbüchern zufolge ist der kosmische Nadelstich – eine so genannte Singularität – von einem Ereignishorizont umgeben. Diese kugelförmige Hülle ist aber keine materielle Oberfläche, sondern ein rein begriffliches Gebilde, das den Radius markiert, innerhalb dessen nichts mehr der Singularität zu entkommen vermag. Gemäß der Relativitätstheorie geschieht an dieser Stelle nichts Besonderes: Dahinter gelten dieselben physikalischen Gesetze wie davor.

Doch für die Quantenmechanik ist der Ereignishorizont zutiefst paradox; denn an ihm verschwindet Information auf Nimmerwiedersehen – und das verbietet die Theorie. »Was wir im Studium gelernt haben, ist fast sicher falsch, denn klassische Raumzeiten mit Schwarzen Löchern widersprechen der Quantenmechanik«, sagt George Chapline vom Lawrence-Livermore-National-Laboratorium in Livermore (Kalifornien).

Ereignishorizont ade!

Das neue Modell für Schwarze Löcher schafft den Ereignishorizont deshalb ab. Stattdessen soll die Gravitation selbst fähig sein, den Kollaps eines Sterns aufzuhalten. Bei einer speziellen Art von Materie wirkt die Schwerkraft nämlich nicht anziehend, sondern abstoßend. Diese geheimnisvolle Substanz namens »Dunkle Energie« ist nach Meinung der Kosmologen für die erst jüngst entdeckte Beschleunigung der kosmischen Expansion verantwortlich.

Vor einem Jahr stellten Pawel O. Mazur von der Universität von South Carolina in Columbia und Emil Mottola vom Los-Alamos-National-Laboratorium ▷

Gemeinsame Leserreise von „Spektrum der Wissenschaft“ und „wissenschaft-online“ (November 2003)

Costa Rica
Tropenwaldreise

Naturkundliche Entdeckungsreise mit Badeaufenthalt

Tropenvielfalt erleben im Regenwald

In Zusammenarbeit mit unserem Partner Waschbär-Reisen ist eine Leserreise für „Spektrum der Wissenschaft“ und „wissenschaft-online“ entstanden, deren Motto lautet:

Sehen – Erleben – Verstehen – Erhalten!

Das erwartet Sie auf dieser Reise:

- **Durchbrechen Sie das Zeitfenster** (Nacht- und Dämmerungsexkursionen)
- **Überwinden von Sichtbarrieren** (Übergang vom Boden- zum Baumkronenkosmos u. a. beim Canopy-Walk in Sta. Elena)
- **Wald-Architektur – wenn Bäume in den Himmel wachsen** (Staunen über Brett-, Stelz- und Luftwurzeln)
- **Gerüche – Aphrodisiaka der besonderen Art** (Blumen- und Fruchtdüfte)
- **Farben – Lippenstifte der Natur** (von der Interaktion Pflanze – Tier, u. a. Kolibri–Blumen)
- **Hörwelten – Kommunikationschaos zwischen Infra- und Ultraschall** (von Klopfkäfern und Fledermäusen)
- **Inventur der Artenvielfalt – La Selva:** Neuzeitliche Entdeckungsreisende (zu Gast bei Biologen und Pharmazeuten)
- **Prioritäten des modernen Umwelt- und Naturschutzes**

Haben wir Sie neugierig gemacht?

Fordern Sie noch heute die ausführlichen Reiseunterlagen an:

Tel.: 06221/9126-743

Fax: 06221/9126-751

E-Mail: marketing@spektrum.com

Oder informieren Sie sich ausführlich im Internet unter www.wissenschaft-online.de/reisen

Spektrum DER WISSENSCHAFT

wissenschaft-online

DIE EXTRASEITE NUR FÜR ABONNENTEN

Als Abonnent von SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT kennen Sie bereits die Vorzüge unseres Magazins, doch seit Februar gibt es noch einen weiteren Zusatznutzen für Sie:

WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE

NUR HIER

EXKLUSIVE ONLINE-ARTIKEL

+ finden Sie jeden Monat einen Online-Artikel aus der spannenden Welt der Wissenschaft, der nicht im Spektrum-Monatsheft publiziert wurde.

NUR HIER

EXKLUSIVE PRODUKTE

+ gibt es Spiele und Produkte mit Pfiff extra für unsere Monatsheft-Abonnenten wie den Dampfball »Heronsring«. Sichern Sie sich dieses Angebot: Denn der Dampfball wird in unserem Jubiläumsjahr exklusiv nur an Spektrum-Abonnenten verkauft.

NUR HIER

EXKLUSIV: ONLINE-ARCHIV

+ stehen Ihnen im Online-Archiv alle Artikel von SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT seit 1993 im Volltext zur Verfügung.

ALLE PREISE VERSTEHEN SICH INKL. UMSATZSTEUER.

EXKLUSIV FÜR ABONNENTEN

Der Kupferblechdampfkessel und die Kugel des Heronsringes sind zu einer Einheit zusammengefasst und mittels zweier leicht laufender Kugellager in einem Aluminiumring befestigt. An zwei gegenüberliegenden Punkten der Kugel sind Düsen angebracht, durch welche der Dampf ins Freie strömt, sodass eine Drehzahl von mehr als 3500 U/min erreicht werden kann. Alle Modelle sind in Handarbeit hergestellte Unikate und mit hochtemperaturbeständigem Einbrennlack beschichtet. Eine Spritze zum Füllen des Kessels sowie eine Bedienungsanleitung liegen bei. Der Versand erfolgt in einer Holzkiste.
Ringdurchmesser 100 mm, Kugeldurchmesser 40 mm. Verschlussdeckel mit Sicherheitsventil. Als technisches Spielzeug nicht für Kinder geeignet. Lieferung ohne Brennspiritus; € 125,– inkl. Versandkosten Inland.

BESTELLUNG FÜR ABONNENTEN UNTER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE, AM LESERSERVICE-TELEFON ODER PER E-MAIL: MARKETING@SPEKTRUM.COM, UNTER ANGABE DER KUNDENNUMMER DES SPEKTRUM-ABOS.

DIE WERTANLAGE MIT DEN BESTEN ZINSEN:

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT bietet Ihnen die aktuellsten Nachrichten aus der spannenden Welt von Forschung und Wissenschaft.

WISSEN

ABONNIEREN ODER VERSCHENKEN SIE SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT UND PROFITIEREN SIE VON DEN VORTEILEN EINES ABONNEMENTS:

- monatlicher Sonderpreis Inland von € 6,30 (statt € 6,90)
- Schüler und Studenten auf Nachweis sogar nur € 5,45
- Anlieferung frei Haus noch vor Verkauf im Handel
- www.spektrum-plus.de: Die exklusive Internetseite nur für Abonnenten
  - Online-Archiv mit freiem Zugang zu allen Spektrum-Monatsheften seit 1993 im Volltext
  - jeden Monat mit einem bisher nicht in Spektrum erschienenen Online-Artikel

Verschenken oder abonnieren Sie SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT und wir bedanken uns mit dem T-Shirt »Pioneer«.

ODER WERBEN SIE EINEN NEUEN JAHRESABONNENTEN UND WÄHLEN SIE EINE DER FOLGENDEN PRÄMIEN AUS:

STIFTHALTER »Weltkugel«

Bei dem dekorativen Stifthalter sitzt eine Weltkugel direkt auf dem Rücken einer mittels modernster Lasertechnik in einen Plexiglaswürfel eingebrannten menschlichen Figur. Die Kugel selbst kann separat vom Stifthalter genommen werden. Maße: 80 × 50 × 50 mm; Lieferung ohne Stift.

BUCH »Farben«

In dem Buch werden anschaulich die Farbpsychologie sowie die Bedeutung von Farben in den Kulturen verschiedener Epochen und Länder erklärt; 420 S., mit zahlreichen Abbildungen.

PREPAIDKARTE
T-Card Holiday der Deutschen Telekom

Telefonieren Sie einfach bargeldlos von jedem Fest- und Mobilnetztelefon. Über eine gebührenfreie Zugangs- und eine geheime Kartennummer wird Ihnen von nahezu jedem öffentlichen und pri-vaten Anschluss die Verbindung frei geschaltet. Das Guthaben beträgt € 20,–.

SPIEL »Wer wird Millionär?« 2. Edition

Das erfolgreiche Quiz-Spiel bietet Ihnen neue spannende Fragen mit steigendem Anspruch.

ORDERN SIE NOCH JETZT SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT UND SICHERN SIE SICH IHREN WISSENSVORSPRUNG!

EINE BESTELLMÖGLICHKEIT FINDEN SIE AUF NEBENSTEHENDEM BEIHEFTER ODER UNTER

WWW.SPEKTRUM.DE

▷ in New Mexico die Hypothese auf, ein wenig von dieser Substanz könnte beim Kollaps eines Sterns wie Wasser gefrieren. Das Resultat nannten sie einen Gravastar: eine Kruste aus extrem dichter, aber ansonsten normaler Materie, die durch ein exotisches Inneres stabilisiert wird. Die Kruste tritt in diesem Modell an die Stelle des Ereignishorizonts.

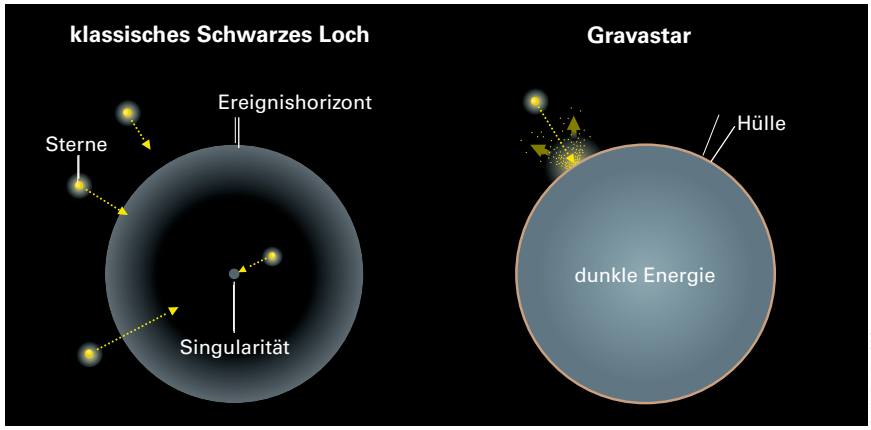
Ein anderer Vorschlag geht noch weiter. Demnach gefriert nicht nur die Dunkle Energie, sondern die Relativitätstheorie verliert zugleich ihre Geltung. Diese Idee stammt von Außenseitern im Wettlauf zu einer Theorie der Quantengravitation. Sie argumentieren mit einer formalen Ähnlichkeit zwischen den physikalischen Grundgesetzen und dem Verhalten von Flüssigkeiten und Festkörpern: In vieler Hinsicht erinnert die Allgemeine Relativitätstheorie an die Gleichungen für die Schallausbreitung in einer bewegten Flüssigkeit. Schallwellen können in solchen Medien ganz ähnlich eingefangen werden wie Licht in einem Schwarzen Loch. Vielleicht ist die Raumzeit also buchstäblich eine Art Flüssigkeit.

Raumzeit als Superflüssigkeit

Bestechend an diesem Ansatz ist, dass in flüssiger oder fester Materie das kollektive Verhalten der Bestandteile die nach außen wahrnehmbaren Eigenschaften bestimmt. Besonderheiten der einzelnen Moleküle wie ihre Geometrie oder Größe zählen kaum; die Eigenschaften des Systems folgen daraus, wie sich die Komponenten miteinander arrangieren. Wenn Wasser gefriert, verändern sich die Moleküle nicht, wohl aber wandelt sich ihr kollektives Verhalten, und die für Flüssigkeiten gültigen Gesetze sind nicht mehr anwendbar.

Nun können bestimmte Flüssigkeiten bei sehr tiefen Temperaturen einen superflüssigen Zustand annehmen, der sogar in makroskopischen Größenordnungen den Regeln der Quantenmechanik gehorcht. Wie Chapline zusammen mit Evan Hohlfeld, Robert B. Laughlin und David I. Santiago von der kalifornischen Stanford-Universität vermutet, spielt sich etwas Ähnliches vielleicht am Ereignishorizont ab. Die relativistischen Gleichungen versagen, und neue Gesetze gelten. »Wenn man sich die Raumzeit als Superflüssigkeit vorstellt, ist es ganz natürlich, dass am Ereignishorizont etwas Physikalisches geschieht – das heißt, der klassische Ereignishorizont wird durch einen quantenphysikalischen Phasenübergang ersetzt«, erklärt Chapline.

Vorläufig sind diese Ideen nur grobe Skizzen, und Kritiker erheben zahllose Einwände. So fragen sie, wie sich eigentlich der Zustand von Materie oder Raumzeit verändert, wenn ein Stern kollabiert.



Im klassischen Bild erscheint ein Schwarzes Loch als unendlich dichter Punkt: eine Singularität. Der Ereignishorizont markiert die Grenze des Bereichs, aus dem nichts zu entkommen vermag. Ein neues Modell betrachtet das Schwarze Loch als »Gravastar«: eine Ansammlung Dunkler Energie mit einer Hülle aus extrem dichter Materie.

Scott A. Hughes vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge meint: »Ich sehe nicht ein, wieso ein massereicher Stern – ein normales gasförmiges Objekt mit recht einfachen Formeln für Dichte und Druck – in ein so bizarres Gebilde wie einen Gravastar übergehen soll.« Im Übrigen sind die gängigen Ansätze für eine Theorie der Quantengravitation schon viel weiter gediehen als die noch sehr vagen neuen Vorstellungen. Zum Beispiel erklärt die Stringtheorie die Paradoxien von Schwarzen Löchern offenbar recht gut, ohne gleich den Ereignishorizont oder gar die gesamte Relativitätstheorie abzuschaffen.

Ob Schwarze Löcher den neuen Modellen oder dem klassischen Bild entsprechen, lässt sich durch astronomische Beobachtungen nur schwer entscheiden – aber ganz unmöglich ist es nicht. Gravitationswellen sollten enthüllen, wie die Raumzeit um mutmaßliche Schwarze Löcher geformt ist. Bei einem punktförmigen Objekt ohne Oberfläche sind die möglichen Geometrien begrenzt. Falls eines der Gravitationswellen-Observatorien, die demnächst den Betrieb aufnehmen, eine andere Gestalt entdeckt, wären die gängigen physikalischen Theorien ein weiteres Opfer der alles zermalmenden Gewalt Schwarzer Löcher geworden. ◁

George Musser ist Redakteur bei Scientific American.

Ereignisloser Horizont

Was geschieht, wenn Sie in ein Schwarzes Loch fallen? Das hängt von der Theorie ab. Gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie fühlen Sie sich die ganze Zeit schwerelos, auch während Sie den Ereignishorizont durchqueren und unaufhaltsam weiter ins Loch stürzen. Da alles in Ihrer nächsten Umgebung mit Ihnen fällt, haben Sie keinen Grund, etwas Ungewöhnliches zu vermuten. Die vernichtenden Gezeitenkräfte machen sich erst später bemerkbar. Nur ein äußerer Beobachter könnte erkennen, was mit Ihnen vorgeht. »Im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie wäre es unmöglich, einen kleinen tragbaren Sensor mit einer Alarmanlage zu bauen, die Ihnen mitteilt: Sie sind gerade in ein Schwarzes Loch gefallen, Ihr letztes Stündlein hat geschlagen«, sagt Scott A. Hughes vom Massachusetts Institute of Technology.

Gemäß den neuen Modellen hingegen brauchen Sie keinen dezenten Hinweis, was Ihnen geschlagen hat, wenn Sie den Horizont erreichen: Sie prallen entweder höchst unsanft gegen eine Hülle aus hyperdichter Materie, oder die Teilchen Ihres Körpers zerstrahlen in Form von Gammaquanten.

SCHMETTERLINGE

Gaukler mit sechstem Sinn

Schmetterlingsmännchen am Amazonas liefern ein neues Beispiel für ausgefallene sexuelle Vorlieben: Sie fliegen auf polarisiertes Licht.

Die Sichtverhältnisse im tropischen Regenwald sind schwierig: ein schummriges Dunkel, gesprenkelt mit flimmernden Lichtflecken und bunten Farbtupfern. Da fällt es einem einsam umherflatternden Schmetterling nicht leicht, den passenden Paarungspartner zu entdecken. Die bunte Flügelzeichnung ist zwar arttypisch, lässt sich aber aus der Ferne nicht unbedingt gut erkennen. Deshalb nehmen Schmetterlinge der Art *Heliconius cydno* zusätzlich ein ausgefalleneres und auffälligeres Merkmal zu Hilfe: die Polarisation des Lichts, das vom Flügel reflektiert wird.

Das Foto auf dieser Seite zeigt ein Weibchen der Art *H. cydno* (oben) im Vergleich mit einem von *H. melpomene* (unten). In beiden Fällen wurden zwei Aufnahmen vom rechten Flügel durch einen Polarisationsfilter gemacht, der zunächst senkrecht und dann waagrecht angeordnet war, und die beiden Bilder anschließend voneinander abgezogen. Die Dif- ▷

A. SWEENEY, DUKE-UNIVERSITÄT

Das Licht, das Weibchen der Art *Heliconius cydno* (oben) reflektieren, ist im Unterschied zu dem von *H. melpomene* (unten) polarisiert (rechter Flügel).

Im Juli bei wissenschaft-online

wissenschaft-online

Die Auseinandersetzung mit der Medizin reduziert sich in der öffentlichen Wahrnehmung zunehmend auf Kostenaspekte und regelmäßige Katastrophenmeldungen. Fortschritte in Forschung und Therapie treten hinter politische Debatten und dramatisierende Szenarien zu Grundversorgungen und Seuchengefahren zurück.

Im Mittelpunkt der täglichen Berichterstattung von wissenschaft-online steht die Forschung. Aktuell und verständlich wird über Erfolge beim Aufdecken komplexer Prozesse und der Entwicklung neuer Wirkstoffe bis hin zur Krankheitsbekämpfung informiert. Hintergrundartikel, Interviews und Diskussionsforen befassen sich über die wissenschaftlichen Grundlagen hinaus mit ethischen und gesellschaftspolitischen Aspekten. Alle aktuellen Artikel zur Medizin sind im Juli frei zugänglich: www.wissenschaft-online.de/medizin

Das Wissen über die medizinischen Möglichkeiten wächst enorm schnell, Primärveröffentlichungen erfolgen dabei meist auf Englisch. wissenschaft-online bietet daher neben Werken wie dem Lexikon der Arzneipflanzen und Drogen auch Onlinezugang zum Fachwörterbuch Medizin von Langenscheidt.

www.wissenschaft-online.de

▷ ferenz zwischen zwei gleichen Farbwerten ist natürlich null. Deshalb ergibt sich, wenn man identische Fotos voneinander abzieht, eine schwarze Fläche. Das trifft für den Flügel von *H. melpomene* zu. Dagegen sind weite Bereiche auf dem Flügel von *H. cydno*, die bläulich schillern, in der Differenz-Aufnahme immer noch deutlich sichtbar. Das kann nur daran liegen, dass das von ihnen reflektierte Licht polarisiert ist und deshalb den Polarisationsfilter in der einen Orientierung passiert, in der anderen dagegen nicht.

Das menschliche Auge vermag die Polarisation von Licht nicht wahrzunehmen. Dagegen sind Männchen von *H. cydno* nicht nur im Stande, sie zu erkennen, sondern fliegen auch darauf. Das bewies ein Team um Alison Sweeney von der Duke-Universität in Durham (North Carolina). Dazu befestigten die Wissenschaftler je ein Flügelpaar eines Weibchens von *H. cydno* und *H. melpomene* unter zwei verschiedenartigen farbtreuen Filtern. Der eine hob die Polarisation des gestreuten Lichts auf, der andere nicht.

Die Forscher beobachteten nun, welches Interesse vorbeifliegende Männchen den künstlich bewegten Flügeln entgegenbrachten. Wie sich zeigte, ließ sich *H. melpomene*, dessen Weibchen keine polarisierenden Flügel trägt, nicht durch irgendwelche Filter beeindrucken. Polarisiert oder nicht – das war dem Schmetterling einerlei. Ganz anders bei *H. cydno*. Er startete deutlich häufiger Annäherungsversuche, wenn der dargebotene Flügel keinen depolarisierenden Filter trug *(Nature, Bd. 423, S. 31)*.

Vermutlich führt die Ausschau nach polarisiertem Licht *H. cydno* schneller und sicherer zu seinem Weibchen. Während das schillernde Blau der Flügel bei der düsteren Beleuchtung in den tiefen Winkeln des Tropenwaldes verfälscht wird, lassen sich die Polarisationsmuster auch unter schwierigen Bedingungen sicher und leicht erkennen. (G.T./T.K.) ◁

NACHGEHAKT

Die Crux mit den Zukunftsvisionen

»Wer Visionen hat, sollte zum Arzt gehen«
Alt-Bundeskanzler Helmut Schmidt

Wie werden wir leben – in zwanzig, in fünfzig Jahren? Schon in naher Zukunft dürften die fossilen Energieträger zur Neige gehen; einen Vorgeschmack der dann auftretenden Spannungen und Verteilungskämpfe gab der jüngste Irak-Krieg, bei dem es zweifellos auch um den ungehinderten Zugang der Industrieländer zu billiger Primärenergie ging. Außerdem belasten die beim Verbrennen von Erdöl und Erdgas erzeugten Kohlen- und Stickoxide die globale Umwelt. Was wird erst, wenn die insgesamt rund zwei Milliarden Inder und Chinesen von Tieren und Fahrrädern auf Autos umsteigen? Alternativen zur fossilen Energiewirtschaft sind also dringend gefragt – aber welche? Wann sind sie einsatzbereit? Antworten kann nur die Wissenschaft liefern.

Doch Vorhersagen sind heikel. »Die Zukunft hat schon begonnen«, titelte Robert Jungk vor vierzig Jahren und zitierte die seinerzeit aktuellste Prognose aus dem Jahre 1960: Binnen zehn Jahren würde der erste Mensch den Mond betreten – richtig! –, der Computer sollte die Fähigkeiten des menschlichen Gehirns erreichen, Krebs heilbar sein und die Kernfusion technisch beherrschbar werden – alles falsch!

Aber nicht nur als notorische Optimisten, auch als Kassandras hatten Zukunftsforscher meist wenig Fortüne. Das berühmte Weltmodell des »Club of Rome« von 1974 sagte eine baldige globale Katastrophe voraus. Es konfrontierte die unleugbare Tatsache, dass die Erde ein endliches System ist, mit exponentiell ansteigenden Kurven für Bevölkerungswachstum, Energie- und Nahrungsbedarf. Wenn aber ein Trend wie die steigende Anzahl der Autozulassungen mit einer Funktion, die schneller anwächst als jede Potenz, in die Zukunft extrapoliert wird, kommt blitzschnell der Tag, an dem die ganze Erde ein einziger Parkplatz ist. Darum sagte der »Club of Rome« den – bei ungebremstem Wachstum tatsächlich unausweichlichen – Kollaps des Weltsystems viel zu früh voraus. Solche Untergangsprognosen wiederum verführen, wenn sie nicht eintreffen, im Gegenzug zu grundlosem Optimismus (siehe »Die Lomborg-Kontroverse«, SdW 8/2002, S. 36).

Jüngst hat ein Team von amerikanischen und britischen Wissenschaftlern einmal mehr in aller Ausführlichkeit die Frage untersucht, wie der Mensch den global wachsenden Energiebedarf künftig befriedigen kann, ohne zugleich das Erdklima durch riesige Kohlendioxid-Emissionen aus dem Lot zu bringen *(Science, Bd. 298, S. 981)*. Das Ergebnis ist ernüchternd: Selbst unter Einsatz aller derzeit verfügbaren Technologien sei dieses Ziel nicht zu erreichen. Darum setzen die Autoren der Studie in einer kuriosen Mischung aus Pessimismus und Science-Fiction erneut auf Technologien, deren Realisierbarkeit in den Sternen liegt. Unter anderem erwarten sie – wie schon weiland Robert Jungk – die baldige Nutzung der kontrollierten Kernfusion.

Zugleich machen sie abenteuerliche Vorschläge, das vom Treibhauseffekt aufgeheizte Erdklima künstlich zu kühlen – etwa den, Staub in die Stratosphäre zu schießen, um die Sonneneinstrahlung zu dämpfen. Sogar ein kosmischer Sonnenschirm von 2000 Kilometer Durchmesser wird erwogen.

Traditionellen Umweltschützern sind solche Visionen natürlich ein Gräuel. Sie hoffen stattdessen mehr oder minder blauäugig, dass Maßnahmen zum sinnvollen Energiesparen das Wachstum des Energiehungers schon bremsen werden. Zudem setzen sie auf die klimaschonende Wirkung bereits verfügbarer Alternativenergien *(Science, Bd. 300, S. 581)*.

Dass die Wissenschaftler sich wieder einmal über die Zukunft nicht einigen können, ist zwar bedauerlich, aber kein Wunder. Wie der Philosoph Karl Popper betont hat, lässt sich die Zukunft schon allein deshalb nicht vorausberechnen, weil wir eben heute nicht wissen können, was Forscher morgen entdecken und Techniker übermorgen erfinden. Darum dürfen wir hoffen – und müssen uns Sorgen machen.

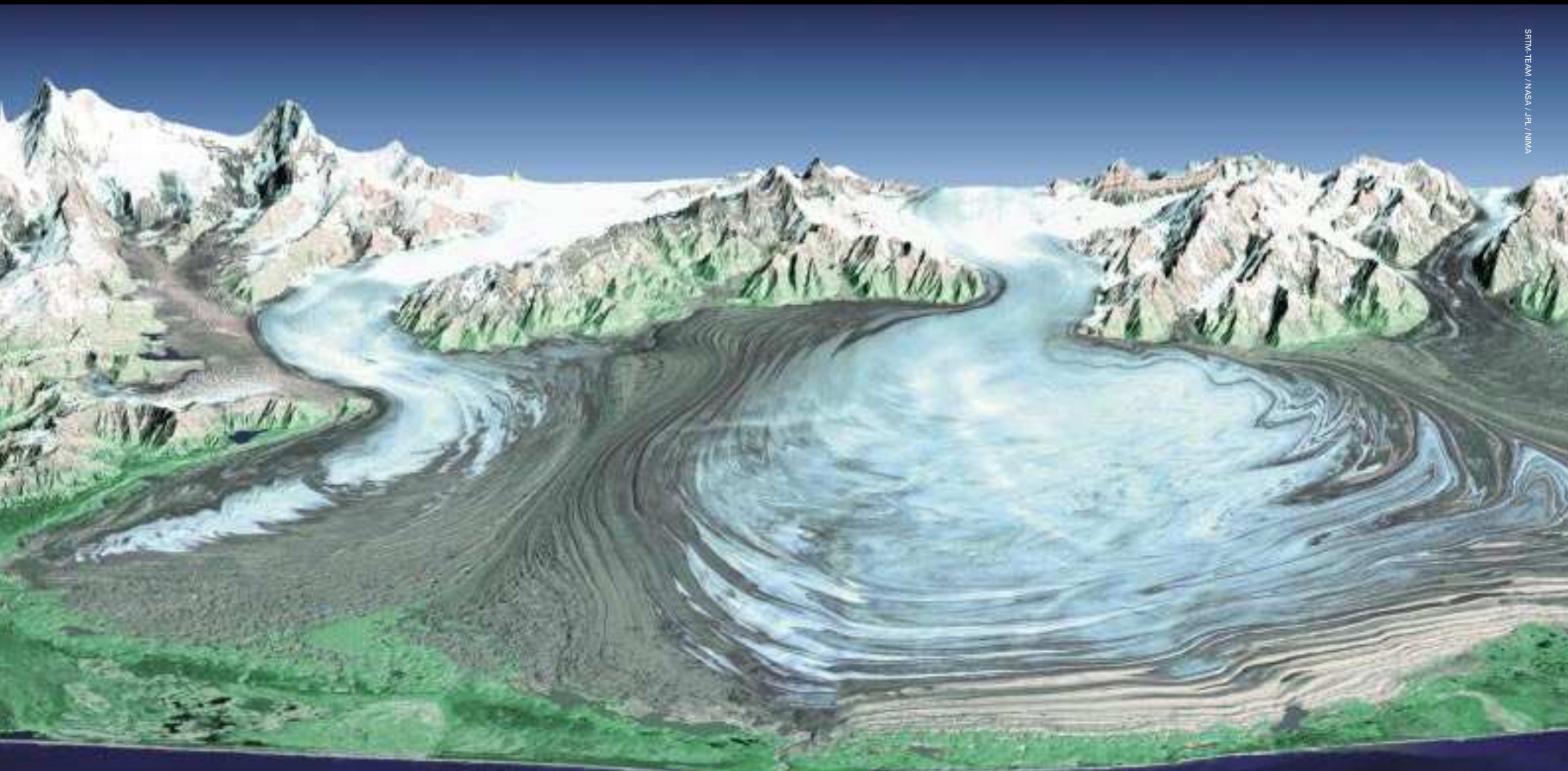
Michael Springer

Der Autor ist Physiker und ständiger Mitarbeiter von Spektrum der Wissenschaft.

BILD DES MONATS

Auslaufende Eismassen

Der Malaspina-Gletscher im Südosten Alaskas zeigt das klassische Erscheinungsbild von Vorland- oder Piedmontgletschern. Sie entstehen, wenn Eismassen aus einem engen Tal in ein breites Tiefland ausströmen, wo sie wie ein Pfannkuchen auseinander laufen. Der Malaspina-Gletscher ist bis zu 65 Kilometer breit und erstreckt sich über 45 Kilometer vom Gebirgsrand bis fast zum Meer. Er wird gleich von mehreren Eisströmen gespeist. Die beiden größten sind hier zu sehen: der Agassiz- (links) und der Seward-Gletscher (rechts). Bei dem Bild handelt es sich um eine künstliche Ansicht, zusammengesetzt aus der Aufnahme eines Landsat-Satelliten und einem Höhenmodell, das mittels Radardaten aus einer Mission der Raumfähre Endeavour erstellt wurde. Die Landsat-Kamera erfasste außer sichtbarem auch infrarotes Licht. Ihre Daten wurden so farbcodiert, dass Eis in hellblau, Schnee in weiß, Vegetation in grün, nackte Erde in grauen und gelbbraunen Tönen und das Meer in dunkelblau erscheint. Wo der Datensatz im Norden endet, bildet er einen künstlichen Horizont unter einem unechten Himmel. Solche Höhenmodelle wurden inzwischen für fast alle Gletscher in nicht polaren Breiten erstellt. Sie können als Bezugspunkt dienen, um Änderungen der Eisströme weltweit festzustellen, die ein wichtiger Indikator für Klimaänderungen sind.



SRTM-TEAM /NASA / JPL / NIMA

Der Widerspenstigen Zähmung

IBM ALMADEN RESEARCH CENTER

Das Rastertunnelmikroskop machte Moleküle erstmals sichtbar – hier eine Aufnahme von Benzolringen, die als Erhebungen mit einer Delle in der Mitte erscheinen.

Vor 25 Jahren ließen sich Chemiker von Erfahrung und Intuition leiten, wenn sie ihre Synthesen entwarfen. Tiefere Einsichten in die elementaren Schritte chemischer Reaktionen erlauben heute ein sehr viel gezielteres Vorgehen.

Von Guy Ourisson

Es mutet merkwürdig an, sich in Gedanken noch einmal um 25 Jahre zurückzuversetzen, um festzustellen, was sich im eigenen Fachgebiet seither geändert hat. Inwieweit haben wir heute Antworten auf Fragen, die wir uns damals stellten oder die wir noch nicht einmal formulieren konnten? Auf diesem Weg zurück in die Vergangenheit wurde ich überrascht von den Schwierigkeiten, die sich mir entgegenstellten: Diese 25 Jahre bilden die zweite Hälfte meiner beruflichen Laufbahn, und ich neige nicht sonderlich zur Selbstbeobachtung. Ich entschloss mich daher, jene Untersuchungen herauszugreifen, für die es Nobelpreise gab, und nachzuzeichnen, wie sie die Chemie umgeformt haben.

Viele der Ehrungen aus Stockholm wurden allerdings für Forschungen vergeben, die zwar von eminenter Bedeutung waren, aber schon sehr weit zurücklagen. Als im Jahre 1979 Georg Wittig und Herbert Brown für ihre Synthesen mit Hilfe von Phosphor- und Borverbindungen ausgezeichnet wurden, standen diese seit Jahrzehnten bereits in den Lehrbüchern über organische Chemie. Die Wittig-Reaktion diente in großtechnischem Maßstab zur Synthese des Lebensmittelfarbstoffs Carotin, und die Reduktion nach Brown wurde zur Herstellung von Raketentreibstoffen genutzt. Auch als 1994 Georges Olah für den Beweis der Existenz von Carbokationen – extrem reaktiven Gruppen mit positiv geladenem Kohlenstoffatom – und für das Studium ihrer Eigenschaften den Nobelpreis erhielt, betraf das Untersuchungen, die er zwanzig Jahre vorher durchgeführt hatte. Diese Auszeichnungen würdigten Revolutionen, die längst passee waren.

Doch die Mehrheit der Nobelpreise illustrierte aktuelle Fortschritte in der Chemie: Sie wurden kurz nach Abschluss von Untersuchungen mit unerwarteten Ergebnissen verliehen oder rückten bahnbrechende Forschungen erst ins rechte Licht. Häufig stammten die ausgezeichneten Arbeiten aus dem Gebiet der Biochemie, das die meisten Chemiker leider Wissenschaftlern überlassen haben, die sie für Biologen halten. Gleichwohl erwuchsen daraus fundamentale neue Einsichten in die chemischen Vorgänge innerhalb der belebten Natur.

Der Aufschwung der Biochemie

Das gilt etwa für die Methode zur Sequenzierung von Nucleinsäuren, für die Paul Berg, Walter Gilbert und Frederick Sanger 1980 geehrt wurden (Sanger hatte zuvor schon einen Nobelpreis für die Sequenzierung von Proteinen erhalten). Sie führte zur Aufstellung von Genom-Bibliotheken, deren Nutzen von der Grundlagenforschung über die medizinische Diagnose und Medikamentenentwicklung bis zur Verbrechensbekämpfung reicht.

Die Methode zum Aufbau von kurzen Peptidketten auf festem Träger, für die Robert Merrifield 1984 ausgezeichnet wurde, lieferte das Vorbild für zahlreiche iterative Synthesen. Der feste Träger kann zum Beispiel aus Polystyrolkügelchen bestehen, die bei Zugabe eines Lösungsmittels aufquellen; dann dringen die gelösten Stoffe in die geöffneten Poren ein. Jedes Kügelchen trägt »Köder«, die sich mit bestimmten Reagenzien verbinden. Bringt man in einer festen Abfolge von Schritten immer wieder einen neuen Köder an und gibt frische Reagenzien zu, erhält man kettenförmige Moleküle aus aneinander gereihten, (fast) identischen Untereinheiten, die Chemiker als Oligo-

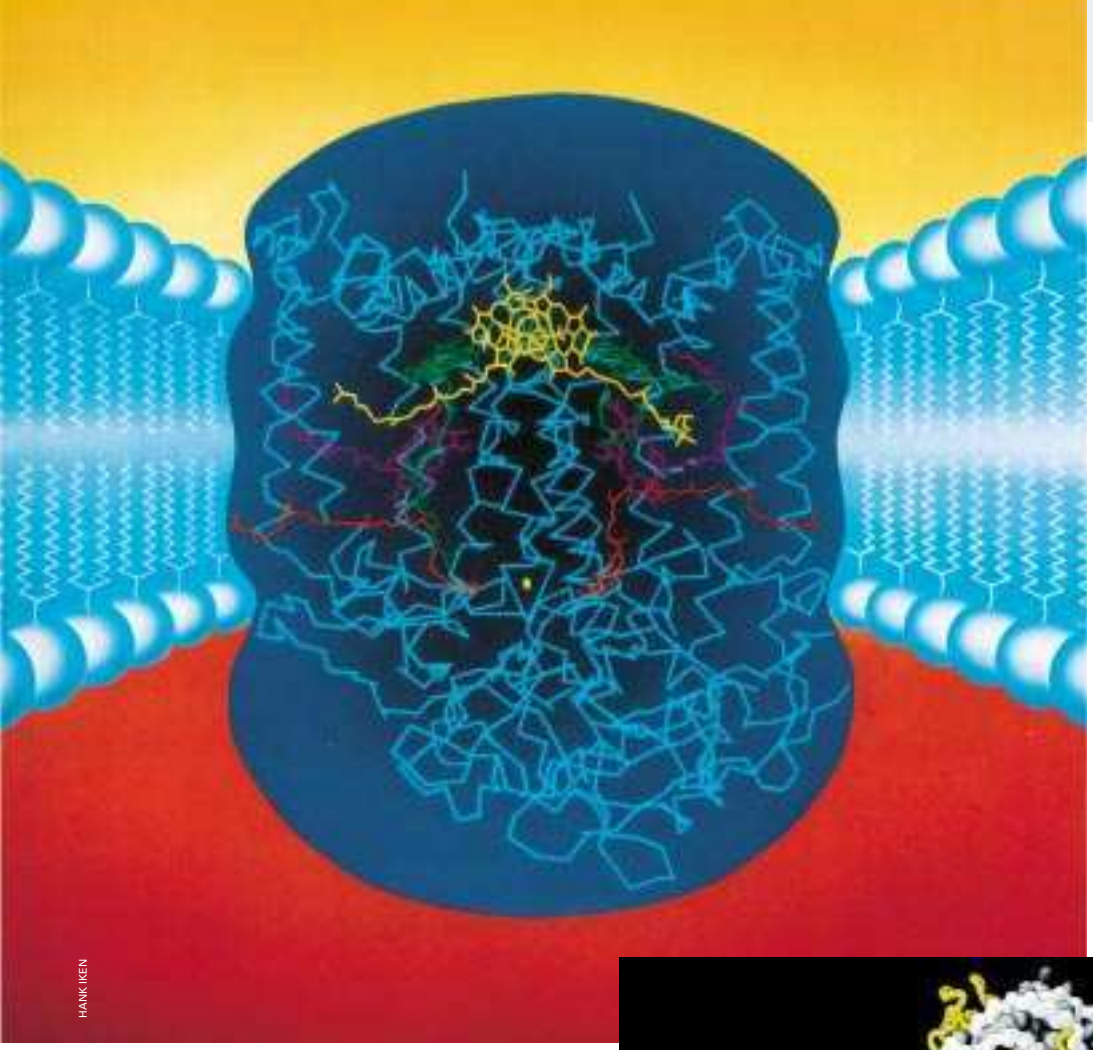
SERIE

25 Jahre Spektrum DER WISSENSCHAFT

In dieser 12-teiligen Serie berichten prominente Forscher aus ihrem Fachgebiet über wissenschaftliche Highlights der letzten 25 Jahre, die aktuelle Situation und künftige Perspektiven.

Teil I: Paläoanthropologie
Teil II: String-Physik
Teil III: Gehirnforschung
Teil IV: Klimaforschung
Teil V: Mathematisches Denken
Teil VI: Ultrakalte Atome
Teil VII: Die Chemie beherrschen

Im nächsten Heft
Teil VIII: Entzifferung des Genoms



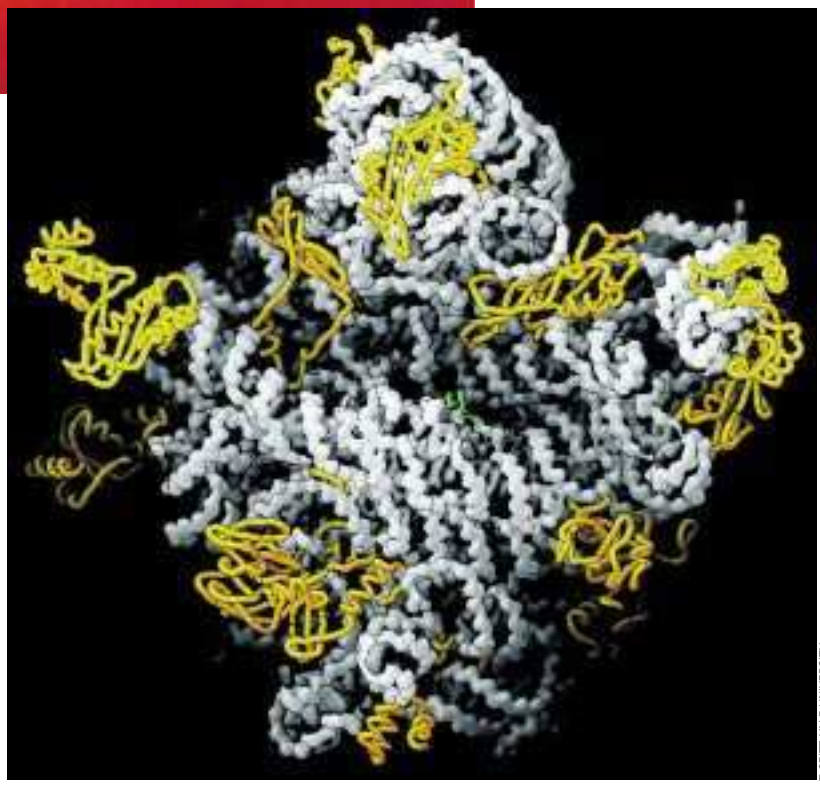
HANK IKEN

Die Bestimmung der Struktur des photosynthetischen Reaktionszentrums beim Bakterium *Rhodopseudomonas viridis* (links) war eine der großen Leistungen der Chemie im letzten Vierteljahrhundert und wurde 1988 mit dem Nobelpreis gewürdigt. Sie bewies, dass auch derart große und komplexe Moleküle der Röntgenstrukturanalyse zugänglich sind. Der gezeigte Proteinkomplex führt den ersten Schritt bei der Umwandlung von Sonnenenergie in Zuckermoleküle durch, der die Grundlage alles Lebens auf der Erde bildet. Inzwischen konnten die Strukturen noch weitaus größerer Biomoleküle ermittelt werden: so die des Ribosoms, der zellulären Eiweißfabrik (unten).

mere bezeichnen. Ab einer bestimmten Kettenlänge spricht man von Polymeren. Handelt es sich bei den Bausteinen um Aminosäuren, so ergeben sich Polypeptide, also kleine Proteine (Eiweißstoffe).

Diese Art von Synthese entwickelte sich zu einer sehr beliebten Methode in der kombinatorischen Chemie. Dabei werden mit automatisierten Verfahren parallel nebeneinander mehrere Arten von Bausteinen auf möglichst vielfältige Weise miteinander verknüpft. So ergeben sich sehr schnell Millionen von Verbindungen mit verwandter Struktur, die man auf ihre biologischen Effekte prüfen kann, um neue Wirkstoffe zu finden. Dieser Ansatz ist genial, wurde aber noch nicht mit einem Nobelpreis ausgezeichnet – zweifellos, weil nur wenige bisher seine ganze Tragweite ermessen.

Johann Deisenhofer, Robert Huber und Hartmut Michel, die Preisträger von 1988, klärten mittels Röntgenbeugung die Struktur des photosynthetischen Reaktionszentrums auf, in dem Pflanzen und manche Bakterien Sonnenenergie in Kohlenhydrate umwandeln. Es ist ein komplexer Verbund aus Chlorophyll und anderen Molekülen, der unter Einwirkung von Licht eine elektrische Spannung zwischen Innen- und Außenseite einer Membran erzeugt (Bild oben). Diese Spannung dient letztlich dazu, Kohlendioxid aus der Luft in



T. SEITZ, YALE UNIVERSITY

Traubenzucker (Glucose) zu überführen. Die geglückte Strukturaufklärung des photosynthetischen Reaktionszentrums zeigte, dass die Röntgenbeugung auch auf große, kompliziert aufgebaute Moleküle anwendbar ist. Daraufhin wurden immer komplexere biologische Gebilde untersucht, darunter auch das Ribosom, an dem die Proteinsynthese stattfindet. Dessen ▷

▷ Struktur ließ sich schließlich vor wenigen Jahren bestimmen.

Außer Proteinen enthalten die Ribosomen auch RNA-Moleküle, die mit der Erbsubstanz DNA verwandt sind. Diesen schrieb man anfangs ausschließlich strukturelle Aufgaben zu. Sidney Altman und Thomas Cech, die Preisträger von 1989, entdeckten jedoch, dass sie auch katalytische Wirkung haben, und nannten sie deshalb Ribozyme. Daraus ergab sich die interessante Hypothese einer »RNA-Welt« in der Frühzeit des Lebens. In ihr hätten Ribozyme die wichtigsten katalytischen Aufgaben in der Zelle wahrgenommen, bevor es Protein-Enzyme gab.

Kary Mullis, Preisträger von 1993, erfand die Polymerase-Kettenreaktion. Mit ihr lassen sich zahlreiche Kopien der DNA-Moleküle in einer Ausgangsprobe herstellen. Diese Vermehrungsmethode für Erbmaterial ist besonders nützlich, wenn man über sehr wenig DNA verfügt. Sie dient beispielsweise in der Gerichtsmedizin dazu, einen Vergewaltiger oder Mörder zu identifizieren beziehungsweise zu überführen. Außerdem wurde sie unter anderem dazu verwendet, anhand von DNA-Resten in Fossilien unsere Verwandtschaft mit dem Neandertaler zu klären.

Einsichten in Abläufe von Reaktionen

Aber die letzten 25 Jahre waren nicht nur ein goldenes Zeitalter der Biochemie. Auch das Verständnis von Reaktionsmechanismen hat große Fortschritte gemacht – in theoretischer wie experimenteller Hinsicht. Kenichi Fukui und Roald Hoffmann wurden 1981 für ihre Erkenntnisse darüber geehrt, welche Rolle die Orbitalsymmetrie für den Verlauf chemischer Reaktionen spielt. Als Orbitale bezeichnet man die Aufenthaltsräume von Elektronen in Atomen. Unter den vielen Faktoren, die den Weg beeinflussen, auf dem Moleküle miteinander reagieren, zählen Symmetrieeigenschaften zu den wichtigsten.

Henry Taube erhielt 1983 den Nobelpreis für seine Untersuchungen zum Übergang von Elektronen zwischen Metallkomplexen: Molekülen, bei denen ein zentrales Metall-Ion symmetrisch von größeren Atomgruppen (Liganden) umgeben ist. Taube konnte zeigen, dass vor dem Transfer erst ein Ligand eine Brücke zwischen den beiden Komplexen bilden muss.

Auch Rudolph Marcus, der Preisträger von 1992, befasste sich mit Elektronentransfers zwischen Molekülen in Lösung. Er arbeitete eine Theorie darüber aus, wie sich die Struktur der Ausgangsmoleküle ändern muss, damit die Reaktion stattfinden kann. Auf diese Weise gelang es ihm, Geschwindigkeiten von Elektronenübertragungen vorherzusagen. Mit seiner Theorie lassen sich viele Phänomene beschreiben – von der Korrosion über die elektrische Leitfähigkeit von Polymeren bis hin zu photochemischen Prozessen.

Den letzten Preis für theoretische Arbeiten gab es 1998. Walter Kohn und John Pople erhielten ihn gemeinsam für die Entwicklung von Näherungsmethoden, um die voraussichtliche Struktur und Stabilität von (noch) unbekannten Molekülen auf quantenchemischer Grundlage zu berechnen. Damit stießen die beiden Laureaten das Tor auf zu einer Chemie, die nicht mehr im Labor, sondern am Computer betrieben wird.

Atomen beim Partnertausch zusehen

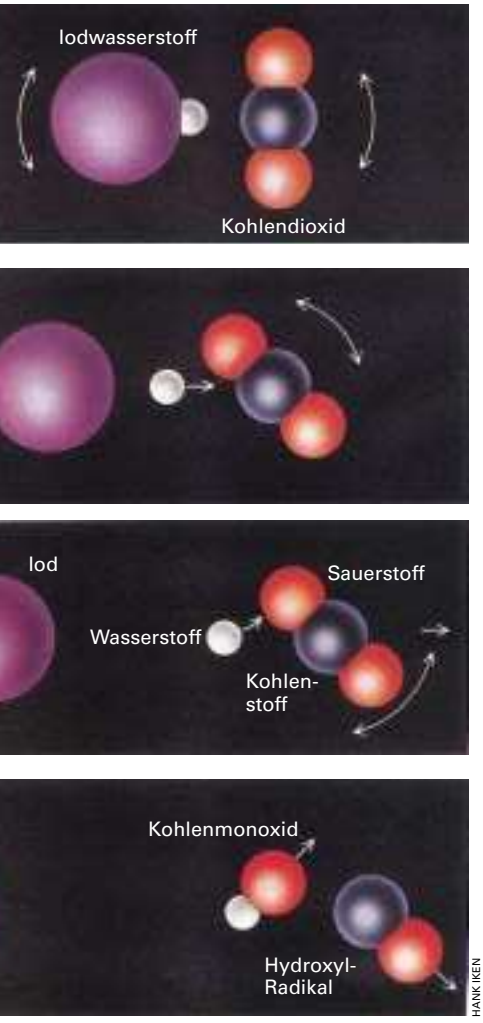
Mindestens ebenso bedeutende Einsichten in die Feinheiten des Reaktionsgeschehens sind aber auch enormen Fortschritten auf experimentellem Gebiet zu verdanken. Wer hätte sich in den 1970er Jahren vorstellen können, dass man einmal in der Lage wäre, den Ablauf einer chemischen Reaktion Schritt für Schritt zu verfolgen? Doch schon 1986 erhielten Dudley Herschbach, Yuan Tseh Lee und John Polanyi den Nobelpreis für Experimente, mit denen sie die Dynamik elementarer Umsetzungen ermittelten. Dabei konnten sie klären, wie zwei Moleküle zusammentreffen, miteinander reagieren und sich in veränderter Zusammensetzung wieder trennen.

In einer Flüssigkeit oder einem Gas sind die Stöße zwischen den Teilchen zufällig; deshalb kennt man weder die Richtung noch die Geschwindigkeit der Reaktionspartner, was die Aufklärung des genauen Umsetzungsmechanismus behindert. Bei der Molekularstrahltechnik der beiden Preisträger bewegen sich die Moleküle dagegen im Vakuum, sodass ihre Bewegungsrichtung und ihre Geschwindigkeit genau festgelegt sind. Kreuzen sie sich, so findet zwischen den Reaktanden eine präzis definierte Kollision statt, die zur Reaktion führt.

Polanyi wandte eine auf der Chemolumineszenz basierende Methode an, um zu verfolgen, wie sich die Energieniveaus der Reaktionspartner ändern. Dazu analysierte er die Infrarotstrahlung, die von den zwischenzeitlich entstehenden direkten Kollisionsprodukten abgegeben wird. Diese so genannten Übergangskomplexe ordnen sich dann um und liefern schließlich das Endprodukt. Polanyis Team konnte somit erstmals einen Übergangskomplex direkt beobachten, dessen Existenz bis dahin nur theoretisch abgeleitet worden war.

Schon immer interessierten sich die Chemiker brennend dafür, was genau während einer Reaktion geschieht. Das Lösen und Knüpfen der Bindungen läuft jedoch unvorstellbar schnell ab: Nach einigen hundert Femtosekunden (10^{-15} Sekunden) ist meist alles vorbei.

Der Verlauf der Reaktion zwischen Iodwasserstoff und Kohlendioxid ließ sich durch Femtosekunden-Spektroskopie im Detail ermitteln. Zunächst spaltet sich Wasserstoff vom Iodwasserstoff ab und bindet sich an das Kohlendioxid. Der so gebildete Übergangszustand zerfällt aber schon nach einigen hundert Femtosekunden, indem der Wasserstoff dem Kohlendioxid eines seiner beiden Sauerstoffatome entreißt. Nach fünf Pikosekunden liegen die Endprodukte vor: Kohlenmonoxid und ein Hydroxyl-Radikal.



HANK IKEN

Um den Ablauf der Reaktion sichtbar zu machen, bräuchte man einen Fotoapparat mit ebenso kurzer Belichtungszeit. Ahmed Zewail entwickelte in den 1980er Jahren eine Stroboskop-Technik mit Laserblitzen von wenigen Femtosekunden Dauer. Mit ihnen konnte er zunächst die Reaktion starten und die Produkte der Umsetzung dann in wechselnden Zeitabständen zur Fluoreszenz anregen. Die ausgesandte Strahlung gab indirekte Auskunft über die Zusammensetzung, relative Position und Gestalt der unmittelbaren Reaktionsprodukte. Das war die Geburtsstunde der Femtochemie, die es erstmals erlaubte, die Umwandlungen von Materie in Echtzeit zu verfolgen. Für diese bahnbrechende Errungenschaft erhielt Zewail 1999 den Nobelpreis.

Im wahrsten Sinne des Wortes globale Bedeutung hatten neue Befunde zum Mechanismus chemischer Umsetzungen in der Erdatmosphäre. Paul Crutzen, Mario Molina und Frank Rowland gelang es in den 1980er Jahren, die Vorgänge bei der Bildung und Zersetzung von Ozon in der Stratosphäre aufzuklären. Damit trugen sie entscheidend dazu bei, die Rolle der Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs) bei der Entstehung des Ozonlochs zu verstehen. Diese chemisch sehr stabilen Substanzen wurden früher in den Kühlaggregaten von Kühlschränken verwendet. Nun entdeckte man, dass sie in der hohen Atmosphäre von Sonnenlicht aufgespalten werden. Die dabei freigesetzten Chloratome können über Reaktionszyklen, bei denen sie sich immer wieder zurückbilden, das Ozon der Stratosphäre zerstören, das uns vor der ultravioletten Strahlung der Sonne schützt. Für diese Entdeckung wurden Crutzen, Molina und Rowland 1995 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet.

Kühne Architektur mit Molekülen

Finden die Ergebnisse von Forschungen Eingang in die Chemievorlesungen an der Universität, so ist das ein sicheres Anzeichen dafür, dass sie Ausgangspunkt umwälzender Neuerungen waren. Das gilt für mindestens drei herausragende Leistungen, die in den letzten 25 Jahren mit dem Nobelpreis gewürdigt wurden. Der erste ging 1987 an Donald Cram, Charles Pedersen und Jean-Marie Lehn für ihre Pionierarbeiten zur supramolekularen Chemie, die sich inzwischen zu einem bedeutenden Forschungsfeld entwickelt hat. Dabei geht es darum, Moleküle über schwache Bindungen – etwa Wasserstoffbrücken oder van-der-Waals-Wechselwirkungen – zu hochkomplexen Gebilden zu koppeln.

Statt immer größere Moleküle durch eine komplizierte chemische Synthese am Stück zu erzeugen, versuchen die Vertreter dieser Fachrichtung, sie nach dem Baukastenprinzip aus Fertigteilen oder maßgeschneiderten Komponenten zusammenzufügen. Das Konstrukt verfügt dann über Eigenschaften oder kann Funktionen ausüben, welche die Elementarbausteine für sich allein nicht aufweisen. Im Idealfall finden sich die Komponenten, wenn man sie geschickt wählt, unter dem Einfluss der zwischenmolekularen Kräfte sogar spontan zusammen – ein als Selbstorganisation bezeichneter Vorgang. Die relative Schwäche der supramolekularen Bindungen kann von Vorteil sein, wenn das Material die Fähigkeit haben soll, sich an Änderungen der Umgebung anzupassen. Es baut sich dann einfach selbst um, wobei bestimmte Komponenten bevorzugt, andere dagegen links liegen gelassen werden. So gelangt man zu einer »adaptiven Chemie«.

Ein weiterer Nobelpreis, den ein Chemiedozent in seiner Vorlesung unmöglich mit Schweigen übergehen kann, ist der von 1996 an Robert Curl, Richard Smalley und Harold Kroto. Er würdigte die ebenso unerwartete wie erstaunliche Entdeckung der Fullerene – jener gänzlich aus Kohlenstoffatomen bestehenden Moleküle, die nach den geodätischen Kuppeln des US-Architekten Richard Buckminster Fuller benannt sind und deren bekanntestes (mit sechzig Atomen) die Form eines Fußballs hat.

Curl, Smalley und Kroto konnten die Substanz 1985 durch Laserverdampfung von Graphit nur in so kleinen Mengen gewinnen, dass eine Strukturbestimmung nicht möglich war. Sie erschlossen ihre Kugelgestalt deshalb allein aus dem massenspektrometrisch bestimmten Molekulargewicht. Erst fünf Jahre später fanden Wolfgang Krätschmer und Donald Huffman bei dem Versuch, im interstellaren Raum vermutete Kohlenstoffmoleküle auf der Erde ▷

▷ herzustellen, eine Methode, auch große Mengen an Fullerenen zu produzieren. Seither kennt man neben Diamant und Graphit nun eine dritte Modifikation von Kohlenstoff.

Die kovalenten Bindungen zwischen den Atomen machen die fußballförmigen Moleküle – oder Buckyballs, wie die Angelsachsen sie liebevoll-salopp nennen – ausgesprochen stabil. Heute staunt man über den Reichtum der Chemie, die sie eröffnen: Fullerene lassen sich durch das Aufpfropfen von molekularen Ästen, Polymerisation zu langen Ketten oder das Anbringen von Gruppen mit gewünschten chemischen Funktionen vielfältig abwandeln. Mit Alkalimetallen bilden sie Verbindungen, die bei tiefen Temperaturen supraleitend sind.

Beim Arbeiten mit Fullerenen wurde ein weiteres viel versprechendes Material entdeckt. Es besteht aus winzigen Kohlenstoff-Röhren, die einige Mikrometer lang und nur ein paar Nanometer dick sind. Zahlreiche Forschungsgruppen untersuchen die mechanischen und elektrischen Eigenschaften dieser »Nanotubes«. Sie sind zehnmal so fest wie Stahl und zeigen interessante Quanteneffekte. Deshalb sagt man ihnen eine bedeutende Rolle in der Nanoelektronik voraus.

In der kombinatorischen Chemie mischt man nach dem Zufallsprinzip molekulare Untereinheiten, die entweder mit einem Roboter oder von Hand auf die Reagenzgläser verteilt werden. Dabei ergibt sich sehr schnell eine große Zahl verwandter Moleküle. Mit einfachen Tests wird dann deren Fähigkeit geprüft, sich an eine biologische Struktur zu heften. So hofft man, unter den Abermillionen von Syntheseprodukten auf Kandidaten für neue Wirkstoffe zu stoßen.

CHARLES O'REAR

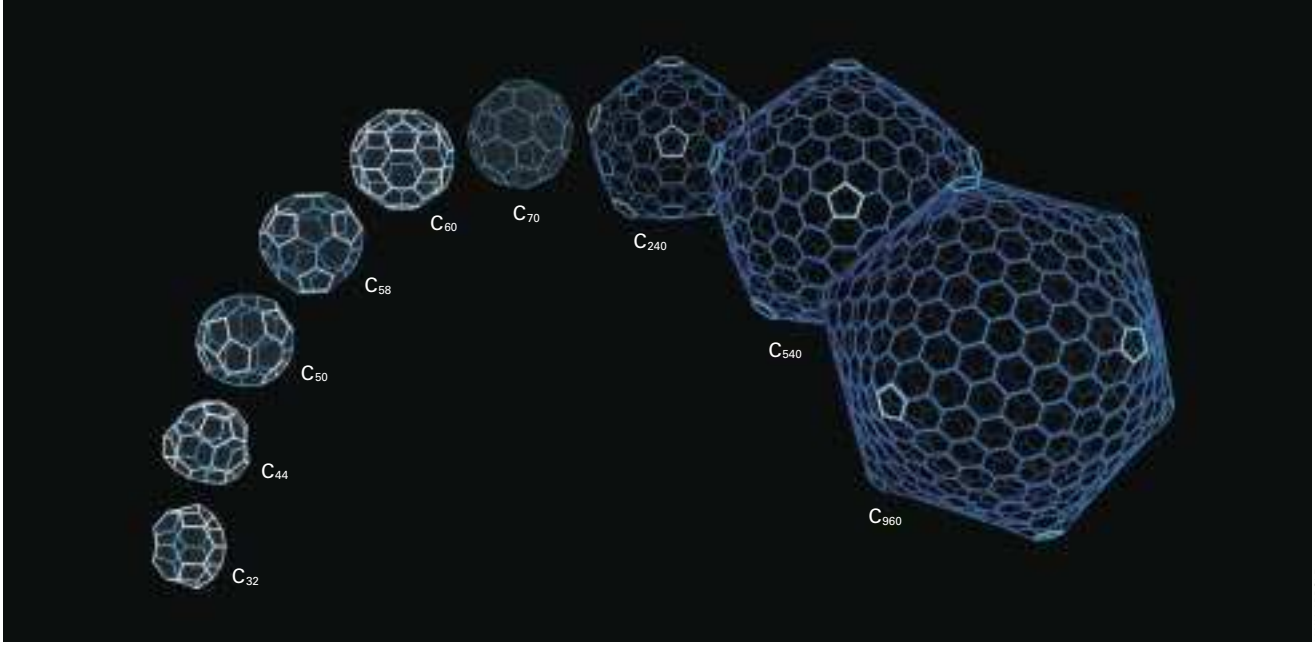
Bravuröse Spiegelfechterei

Auch die wissenschaftlichen Leistungen, denen der Nobelpreis von 2001 galt, gehören heute schon zum Standardstoff in Vorlesungen der organischen Chemie. Erbracht haben sie William Knowles, Barry Sharpless und Ryoji Noyori mit ihren Arbeiten zur Katalyse asymmetrischer Reaktionen (zu den Pionieren dieses Gebiets zählt auch Henri Kagan). Sehr viele Moleküle existieren in zwei Formen, die sich wie Bild und Spiegelbild zueinander verhalten. Da sie diese Eigenschaft mit unseren Händen gemeinsam haben, nennt man sie chiral (nach griechisch cheir, Hand). Pharmazeutische Produkte bestehen oft aus spiegelbildlichen Molekülen, von denen meist nur das eine wirksam, das andere dagegen inaktiv oder manchmal sogar schädlich ist. Traditionelle Herstellungsverfahren erzeugen beide Formen in gleichen Mengen, sodass man die Hälfte des Produkts mühsam nachträglich abtrennen und verwerfen muss. Deshalb ist die chemische Industrie sehr an Synthesen interessiert, die von Anfang an nur das wirksame Molekül liefern.

Die Preisträger entwickelten Katalysatoren, die genau das leisten. Dabei handelt es sich um Moleküle, die selbst ebenfalls chiral sind. Wie alle Katalysatoren beschleunigen sie die gewünschte Reaktion, ohne dabei verbraucht zu werden. Heute werden sie bereits bei der industriellen Synthese einer breiten Palette von Pharmazeutika genutzt; dazu gehören Antibiotika, Entzündungshemmer und Medikamente gegen Herzschwäche.

Hat sich die Praxis der Chemie in den vergangenen 25 Jahren verändert? Der vielleicht auffälligste Wandel hängt mit der Computertechnik zusammen. Wie in anderen Disziplinen auch, verbringen die Forscher inzwischen viel Zeit im Internet. Noch nie war es so leicht, sich über die neuesten Publikationen auf dem Laufenden zu halten – und noch öfter als früher häuft man dadurch Stöße von Artikeln an, die man doch nie lesen wird.

Aber die experimentelle Praxis hat sich ebenfalls merklich weiterentwickelt, wenn auch eher evolutionär als revolutionär. Heute verfügen Chemiker über eine größere Palette an Reagenzien – dank der Verwendung von exotischeren Elementen des Periodensystems. Die chromatographischen Trennmethoden sind vielfältiger geworden und laufen inzwischen großenteils automatisiert ab. Physikalische Verfahren wie die kernmagnetische Resonanz und die Massenspektrometrie, die zur Analyse und Strukturbestimmung von Molekülen dienen, haben enorm an Präzision gewonnen. So sind die Frequenzen bei der Kernspinresonanz 10- bis 15-mal höher als vor 25 Jahren, was entsprechend schärfere Signale ergibt. Dies hat zusammen mit raffinierten Auswertungsverfahren dafür gesorgt, dass heute die Struktur von Proteinen mit Molekulargewichten bis 30 000 Dalton in Lösung bestimmt werden kann. Für seine Pionierleistungen auf diesem Gebiet erhielt Kurt Wüthrich die eine Hälfte des Chemie-Nobelpreises 2002.



IAN WARPOLE

Die Entdeckung der Fullerene – fußballartiger Verbindungen aus Kohlenstoffatomen – war in den 1980er Jahren eine Sensation.

Die andere Hälfte ging an John Fenn und Koichi Tanaka, die für eine ähnlich rasante Steigerung bei der Massenspektroskopie sorgten: Das Molekulargewicht der Substanzen, die sich mit diesem Verfahren untersuchen lassen, stieg von 500 auf 50 000 Dalton. Ermöglicht haben das ingeniöse Methoden wie die Elektrospray-Ionisation und die sanfte Laser-Desorption, mit denen es gelingt, große Moleküle auf schonende Weise in den Gaszustand zu bringen und zu ionisieren – eine Voraussetzung für die massenspektroskopische Analyse. Diesen Fortschritten ist es zu verdanken, dass Forscher heute fast schon routinemäßig mit verschiedenen physikalischen Methoden die Struktur von Proteinen ermitteln können, bei denen dies früher undenkbar schien.

Atome werden sichtbar

Auch in der Mikroskopie hat es schier unglaubliche Durchbrüche gegeben. Im optischen Bereich wurde durch diverse Tricks das so genannte Beugungslimit überlistet, das nur die Abbildung von Strukturen erlaubt, die größer sind als die halbe Wellenlänge des verwendeten Lichts. Zugleich machte die konfokale Mikroskopie Schluss mit der Einschränkung, dass sich ausschließlich Strukturen in der Fokusebene scharf abbilden lassen.

Den sensationellsten Fortschritt aber brachten die Rastersondenmikroskope. Sie tasten die Oberfläche der Probe mit einer extrem feinen Spitze ab und registrieren die dabei auftretende Wechselwirkung. Mit ihrer Hilfe konnten Chemiker die Objekte ihres Tuns, die Atome und Moleküle, erstmals direkt sehen.

Im Fall des Rastertunnelmikroskops, das seinen Erfindern Gerd Binnig und Heinrich Rohrer 1986 die Hälfte des Physik-Nobelpreises einbrachte, misst man die Intensität des so genannten Tunnelstroms, der zwischen der Spitze und der Probe fließt. Beim Rasterkraftmikroskop wird die Spitze wie die Nadel eines Plattenspielers mit einer bestimmten Andruckkraft über die Probenoberfläche geführt und dabei registriert, wie sich der Balken, an dem sie sitzt, verbiegt und verdrillt. Mit einem solchen Mikroskop kann man Objekte nicht nur abbilden, sondern auch auf atomarer Skala verändern, indem man Atome darauf verschiebt.

Zum Schluss sei ein gesellschaftlich wichtiger Trend hervorgehoben, der die Entwicklung der Chemie speziell im industriellen Bereich im letzten Vierteljahrhundert gekennzeichnet hat: Sie ist deutlich sauberer geworden. Umweltskandale in den 1960er und 1970er Jahren haben dem Fach ein ausgesprochen negatives Image verpasst. In den Augen der Öffentlichkeit geriet die Chemie zum Inbegriff des Giftigen, Schmutzigen und Naturwidrigen.

Doch dieses Bild ist nicht mehr gerechtfertigt. Drohte beispielsweise der Rhein einst zum toten Gewässer zu werden, so hat er sich dank der allgemeinen Einführung von Kläranlagen und der ständigen Überwachung ihrer korrekten Funktion wieder zu einem intakten aquatischen Lebensraum entwickelt. Die Zeit ist lange vorbei, als Chemiebetriebe ihre Neben- oder Abfallprodukte einfach in die Luft bliesen oder in Flüsse ableiteten. Heute werden solche unerwünschten Stoffe abgefangen und geregelt entsorgt oder zurückgewonnen. Außerdem entstehen dank der zunehmenden Beherrschung der Chemie – der wachsenden Fähigkeit, Reaktionen mit raffinierten Katalysatoren immer genauer zu steuern – von vorneherein deutlich weniger Nebenprodukte, die es zu beseitigen gilt.

Insofern haben die großen Fortschritte in der Grundlagenforschung nicht nur bewirkt, dass wir heute beispielsweise über bessere Medikamente mit weniger Nebenwirkungen verfügen, sondern dass auch unsere Umwelt kaum noch leidet. Dies gilt umso mehr, als selbst Chemieprodukte in zunehmendem Maße nach Gebrauch wiederverwertet werden. ◁

AUTOR

Guy Ourisson ist emeritierter Chemie-Professor an der Universität Louis Pasteur in Straßburg und ehemaliger Präsident der Französischen Akademie der Wissenschaften.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Neue Befunde: Die Herkunft von Ötzi

Dem steinzeitlichen Gletschermann aus den Ötztaler Alpen entlocken Forscher immer noch spektakuläre neue Fakten zu Leben und Sterben. Pflanzenanalysen kreisen nun seinen letzten Wohnort und den wirklichen Todeszeitpunkt ein. Rätselhaft bleiben Ötzis Beruf und die Todesursache.

LANDESGENDARMERIEKOMMANDO FÜR TIROL / ÖSTERREICH

Von James H. Dickson, Klaus Oeggl und Linda L. Handley

Seit fast zwölf Jahren beschäftigt die Gletschermumie vom Hauslabjoch der Ötztaler Alpen die Fantasie von Laien und Experten. Noch nie konnte die Wissenschaft einen derartig hervorragend erhaltenen Toten solch hohen Alters untersuchen, noch dazu mitsamt Kleidung und Ausrüstung. Als Bergsteiger am 19. September 1991 die Leiche in über 3000 Meter Höhe nahe bei der italienisch-österreichischen Grenze fanden, ragten nur die Schultern, der obere Rücken und der Hinterkopf aus dem Eis.

Die sofort informierten Behörden dachten zuerst an einen der vielen alljährlich vermissten Alpinisten, die manchmal nach Jahren oder Jahrzehnten wieder aus Alpengletschern ausapern. Doch Besucher des Fundorts äußerten den Verdacht, vielleicht stamme dieser Mensch aus dem Mittelalter oder sogar aus noch früherer Zeit. Denn bei ihm lagen ungewöhnliche Gegenstände und Reste sehr altertümlich wirkender Kleidung.

Wenige Tage später konnte die Mumie geborgen werden und wurde nach Innsbruck geflogen. Die dortigen Gerichtsmediziner zogen den Prähistoriker Konrad Spindler von der Universität Innsbruck hinzu – der an den Beifunden sofort erkannte, dass dieser Tote wenigsten 4000 Jahre alt sein musste. Damit ist der Gletschermann sehr viel älter als die Moorleichen aus Norddeutschland und Jütland, die überwiegend aus der Eisenzeit stammen, und sogar älter als die ägyptischen Königsmumien. Wie bald klar wurde, hatte der Mann offenbar all die Jahrtausende im Eis gelegen. In dem ungewöhnlich warmen Spätsommer 1991 schmolz dieses weit genug ab, um ihn halb freizugeben. Dazu trugen in dem Jahr auch beträchtliche Mengen von Saharastaub bei, die sich auf dem Gletscher abgelagert hatten und warme Sonnenstrahlung einfingen.

Bald entwarfen Wissenschaftler und Journalisten Szenarien, wie und wo dieser Mann wohl gelebt hatte und warum er gestorben war. Nach Spindlers Schluss-

IN KÜRZE

Die neuesten Forschungsergebnisse klärten viele Fragen zum Gletschermann. Sie brachten aber auch einige unerwartete Aspekte.

- Demnach starb Ötzi nicht im Herbst, sondern im **Frühjahr**.
- Er wurde etwa 46 Jahre alt und war zuletzt nicht bei guter **Gesundheit**.
- Vielleicht erlag er einem **Pfeilschuss** in den Rücken.
- Wahrscheinlich war er nicht an derselben Stelle gestorben, wo man ihn fand.
- Seine **Hauptnahrung** in den letzten Lebenstagen waren Brot und Fleisch.
- Offenbar hatte er die letzte Zeit in **Südtirol** gelebt.

Nach über 5000 Jahren tauchte diese Leiche eines Mannes am Rande eines Gletschers auf. Als Bergsteiger sie entdeckten, waren Arme und unterer Rücken noch nicht zu sehen.

folgerungen könnte der Tote ein Hirte gewesen sein. Er wäre im Streit verletzt worden und hätte sich daraufhin auf die Hochweiden geflüchtet, wohin er im Sommer seine Schaf- oder Ziegenherden trieb. Allerdings war jetzt schon der Herbst mit eisigen Nächten gekommen. Der Mann legte sich zum Ausruhen in einer Mulde auf einen Fels, schlief vor Erschöpfung ein und wachte nie wieder auf. Nach dieser Theorie schneite die Leiche schnell ein, sodass Aas fressende Tiere nicht an sie herankamen. Anschließend wurde der eingeschneite Tote in dem kalten Klima sehr schnell regelrecht gefriergetrocknet, deswegen der gute Erhaltungszustand. Spindler vermutete auch, der Steinzeitmann sei an derselben Stelle gestorben, wo die Wanderer ihn später fanden.

Weil anfangs niemand den Wert des Fundes ahnte, gingen die Helfer und Schaulustigen bei der Bergung der Mumie und der aufschlussreichen Artefakte zunächst recht grob zu Werke. Sie zertrampelten oder zerbrachen einige der Objekte und beschädigten auch die Leiche selbst, als sie sie mühsam bei widrigem Wetter aus dem Eis schlugen. Dank der günstigen Witterung im folgenden Sommer konnten Archäologen die Stelle jedoch nochmals ausgraben und die nähere Umgebung absuchen. Dabei fanden sie viele weitere wertvolle Details. Besonders die pflanzlichen Materialien – Samen, Blatt- und Holzstückchen sowie verschiedenartiges Moos – sollten sich als sehr informativ erweisen. Spuren von Moos und Pflanzenreste hatten Konservatoren des Römisch-Germanischen Zentralmuseums in Mainz auch vorher schon aus Ötzis Kleidung waschen können.

Nahrungsreste im Darm

Nach über zehn Jahren ergeben die wissenschaftlichen Untersuchungen von uns und einer Reihe unserer Kollegen ein genaueres, teilweise anderes Bild vom Eismann, als es sich anfänglich darbot. Zu den neuen Deutungen verhalfen neben den Pflanzenanalysen der Beifunde wesentlich auch Untersuchungen des Darminhalts der Gletscherleiche, die in den letzten Jahren gelangen.

Die Mumie lag in 3210 Meter Höhe in einer flachen Felsmulde, 92 Meter südlich der Grenze zwischen Österreich und Italien. Ganz in der Nähe führt ein für geübte Wanderer gut erreichbarer Pass, das Hauslabjoch, vom Schnalstal auf italienischer Seite zum Ventertal in Österreich, somit vom Vintschgau in Südtirol zum Ötztal im Norden. Der Tote lag in unnatürlicher Haltung bäuchlings über einem Felsen. Den gestreckten linken Arm hatte er in Schulterhöhe vor dem Körper sperrig scharf nach rechts abgewinkelt. Die rechte Hand war seitlich unter einem schweren Stein verkeilt. Kleidungsfetzen und Habseligkeiten la- ▷

gen mehrere Meter um ihn herum. Auch diese Stücke waren vor der Bergung größtenteils eingefroren.

Zur Altersfeststellung bestimmten drei Labors die Kohlenstoffisotope von Pflanzenproben und von Gewebeproben der Leiche. Alle drei kamen einhellig auf rund 5300 Jahre. Demnach lebte Ötzi noch in der Jungsteinzeit. Mit 1,59 Metern war der Mann nicht besonders groß, wäre aber unter der heutigen Bevölkerung des Schnalstals nicht als ungewöhnlich klein aufgefallen. Erbgutvergleiche zur Klärung seiner Herkunft verweisen auch eher nach Mitteleuropa, nicht auf den nahe gelegenen Mittelmeerraum.

Da die Todesumstände viele Rätsel aufwerfen, interessierten sich die Forscher stark für die Kondition und die Gesundheit dieses Menschen. Knochenuntersuchungen zufolge wurde Ötzi ungefähr 46 Jahre alt. Er war für seine Zeit also eher schon ein älterer Mann. Seine Zähne waren stark abgenutzt. Sicherlich ging dies auf die damals übliche Ernährung mit Mehl, das viel Steinabrieb enthielt, und das fortgeschrittene Alter des Mannes zurück.

Die gründliche Untersuchung zeigte, dass er statt zwölf nur elf Rippen besaß, eine seltene angeborene Anomalie, die ihn vermutlich nicht beeinträchtigte. Die siebente und achte linke Rippe waren einmal gebrochen gewesen und zu Lebzeiten wieder verheilt. Wie Peter Vanezis von der Universität Glasgow feststellte, ist die rechte Hälfte des Brustkorbs verformt: Möglicherweise sind die dritte und vierte rechte Rippe gebrochen. Wie auch die Fraktur des linken Arms geschah dies aber erst nach dem Tod. Diese beiden Untersuchungsbefunde werden heute neben anderen Indizien als Hinweis darauf gewertet, dass Ötzi nicht als schwer Verwundeter starb, wie Spindler vermutete. Auch das Loch am Hinterkopf entstand nach heutiger Auffassung nachträglich, und zwar durch Druckeinwirkung der Eismassen. Weder scheint es von einem Schlag auf den Schädel herzurühren, wie anfangs angenommen, noch dürfte das Gewebe an dieser Stelle bei gelegentlichem Auftauen verwest sein.

SÜDTIROLER ARCHÄOLOGIEMUSEUM, ITALIEN

Ötzi besaß einen wetterfesten Grasmantel, eine Bärenfellmütze und mit Gras gefütterte Schuhe aus Fell und Leder. Unter dem Mantel trug er Pelzkleidung.

Wahrscheinlich taute die Leiche aber später mehrmals an. Denn die oberste Hautschicht fehlt komplett. Sie dürfte sich im Schmelzwasser gelöst und zersetzt haben. Dabei verlor der Eismann auch Haare und Nägel. Ein einziger loser Fingernagel fand sich noch. Dieser offenbart neben anderen Indizien, dass der Mann, ob er nun eines gewaltsamen Todes starb oder nicht, alles andere als gesund war. Der Nagel weist als Zeichen von Wachstumsstörungen bei schwerer Krankheit drei Querfurchen (Beau-Linien) auf. Demnach war der Tote im letzten halben Jahr seines Lebens dreimal ernstlich krank. Als Letztes muss es ihn zwei Monate vor seinem Tod mindestens zwei Wochen lang besonders schwer getroffen haben. Ob die Peitschenwürmer, deren Eier Horst Aspöck von der Universität Wien im Darm der Mumie entdeckte, dem Mann akut zu schaffen machten, wissen wir nicht, da sich nicht erkennen lässt, wie stark der Befall war. Unter Umständen löst dieser bis fünf Zentimeter lange Darmparasit ruhrartige Durchfälle aus.

Rätselraten um die Tattoos

Die vielen Tätowierungen mit Holzkohlestaub, die in der Lederhaut noch zu sehen sind, hatten vermutlich medizinische Bedeutung. Fast alle bestehen nur aus ein paar einfachen Strichen. Zudem sitzen die meisten an oder dicht bei chinesischen Akupunktur-Punkten beziehungsweise an Stellen, wo den Mann Arthritis geplagt haben könnte: im Kreuzbereich sowie am rechten Knie und an der rechten Fessel. Zu einer mutmaßlichen medizinischen Behandlung von Gelenk- oder Rückenbeschwerden passt jedoch nicht, dass sowohl Vanezis als auch Franco Tagliaro von der Universität Rom auf Röntgenaufnahmen keine merklichen Anzeichen für Arthritis entdeckten.

Am linken kleinen Zeh dürfte der Mann schon zu Lebzeiten Erfrierungen erlitten haben. In Ötzis Kleidung fanden sich Reste zweier Menschenflöhe. Läuse entdeckten die Wissenschaftler nicht. Vielleicht verschwanden sie aber nur mitsamt der Oberhaut und den Haaren.

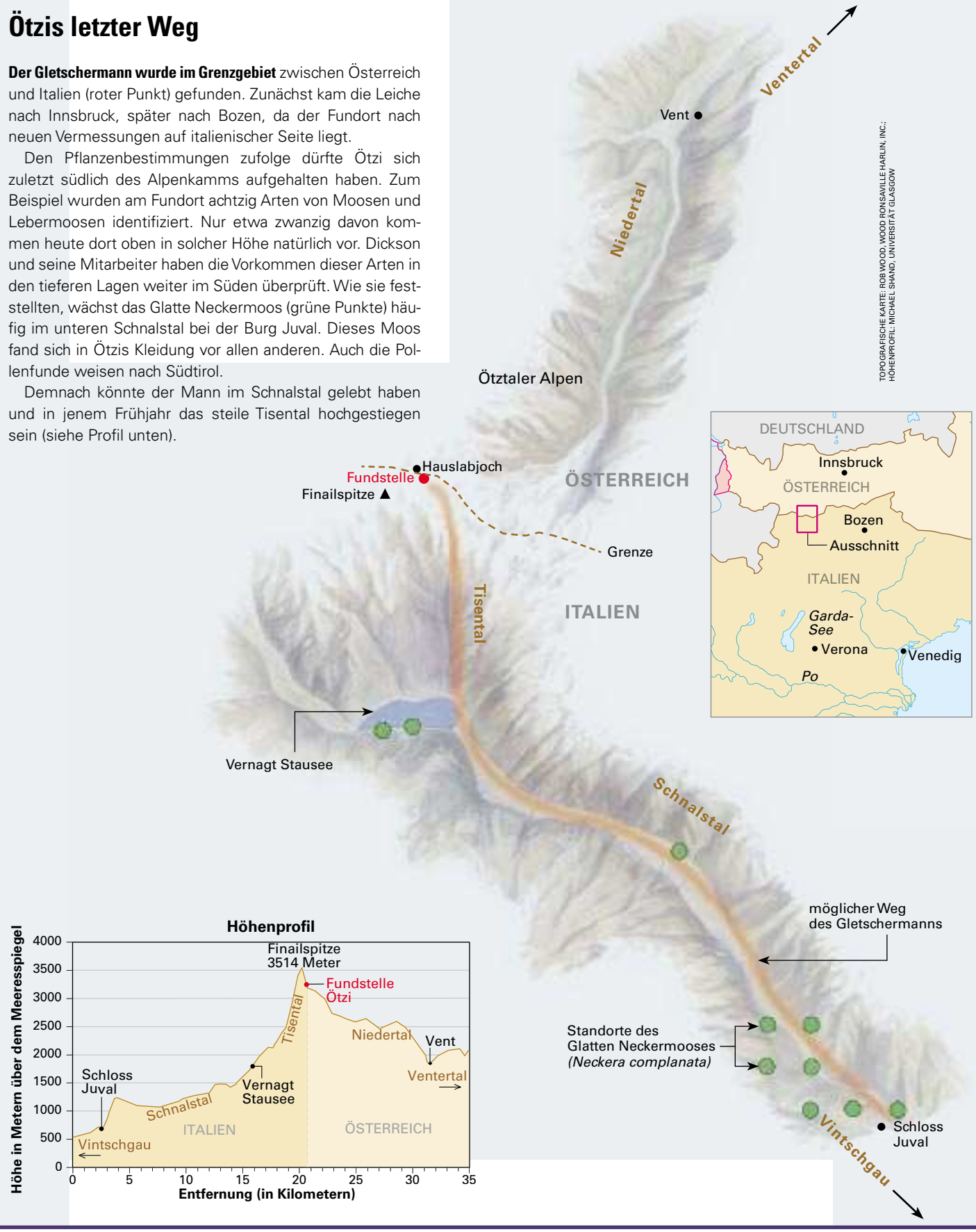
Die Kleidung und die Habseligkeiten des Geltschermanns brachten viele neue Einblicke in die Lebensweise der damaligen Menschen. Seine erstklassige Ausstat-

Ötzis letzter Weg

Der Gletschermann wurde im Grenzgebiet zwischen Österreich und Italien (roter Punkt) gefunden. Zunächst kam die Leiche nach Innsbruck, später nach Bozen, da der Fundort nach neuen Vermessungen auf italienischer Seite liegt.

Den Pflanzenbestimmungen zufolge dürfte Ötzi sich zuletzt südlich des Alpenkamms aufgehalten haben. Zum Beispiel wurden am Fundort achtzig Arten von Moosen und Lebermoosen identifiziert. Nur etwa zwanzig davon kommen heute dort oben in solcher Höhe natürlich vor. Dickson und seine Mitarbeiter haben die Vorkommen dieser Arten in den tieferen Lagen weiter im Süden überprüft. Wie sie feststellten, wächst das Glatte Neckermoos (grüne Punkte) häufig im unteren Schnalstal bei der Burg Juval. Dieses Moos fand sich in Ötzis Kleidung vor allen anderen. Auch die Pollenfunde weisen nach Südtirol.

Demnach könnte der Mann im Schnalstal gelebt haben und in jenem Frühjahr das steile Tisental hochgestiegen sein (siehe Profil unten).

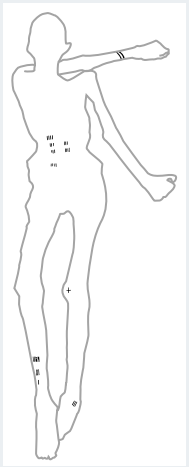


Was die Indizien über den Eismann erzählen

Ergebnisse aus zehn Jahren Forschung

Ötzi verlor sein Haupthaar, wie auch alle Nägel, erst nach dem Tod. Wahrscheinlich trug er einen Bart. Die noch gefundenen bis zu neun Zentimeter langen Haupthaare zeigen, dass der Mann sich von gemischter Kost ernährte.

Ötzi war 1,59 Meter groß. Der Körper trocknete nach dem Tod fast ganz aus. Die Eislasten deformierten die Oberlippe, die Nase und die Ohren.



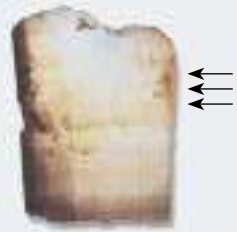
Die Leiche trägt an mehreren wenig auffälligen Stellen einfache Tätowierungen, besonders auf der Rückseite. Sie hatten wohl vor allem einen medizinischen Sinn.

Der Zahnschmelz besagt, dass der Mann in mindestens zwei verschiedenen Gegenden lebte.

Die Mütze war aus dem Pelz eines Braunbären genäht.

Der kleine Dolch hat einen Eschenholzgriff.

Die Finger krümmten sich nach dem Tod. Der einzige gefundene Fingernagel (unten) weist drei Streifen auf, die zeigen, dass der Mann in den letzten Monaten dreimal an schweren Krankheiten litt.



Der Darm enthielt sehr feines Mehl der alten Weizenart Einkorn. Dazwischen sind als gröbere dunkle Strukturen Holzkohle-Partikel erkennbar (Bild oben). Beides deutet darauf hin, dass der Mann auf offenem Feuer gebackenes Brot gegessen hatte.

SÜDTIROLER ARCHÄOLOGIEMUSEUM, ITALIEN (WWW.ICEMAN.DE); (GLETSCHERMUMIE, BELL, BÄRENFELLMÜTZE); CHRISTIN BEECK, ENTNOMMEN AUS »DIE GLETSCHERMUMIE VOM ENDE DER STEINZEIT. AUS DEN ÖTZTALER ALPEN, VORBERICHT«, RÖMISCH-GERMANISCHES ZENTRALMUSEUM, MAINZ (RGZM) (SCHUHE, GÜRTELTASCHE, DOLCH); ENTNOMMEN AUS »DIE GLETSCHERMUMIE«, RGZM (GESAMTAUFNAHME DER GLETSCHERMUMIE)

Der Darminhalt bezeugt eine gemischte tierisch-pflanzliche Ernährung. Dazu gehörten in den letzten Lebenstagen Rothirsch, Steinbock und Getreidemehl.

Unversehrte Pollenkörner (oberes Bild) der Hopfenbuche (unteres Bild) weisen auf den Todeszeitpunkt und den letzten Aufenthaltsort hin.

Das älteste bekannte vollständige Beil besaß eine Kupferklinge (hier etwas herausgezogen). Sie wurde mit Birkenteer und schmalen Lederriemen in einem Eibenholzschaft gehalten, der in einem Stück aus dem Stamm und einem rechtwinkelig gewachsenen Ast geschnitzt wurde.

Die Schuhe waren sorgfältig aus Fell genäht und mit Heu ausgestopft, das ein inneres Netz hielt. Sie waren vermutlich schon stark abgetragen.

Im Darm fanden sich Spuren des Glatten Neckermooses *(Neckera complanata)*, das in solcher Höhe nicht wächst, aber im unteren Schnalstal häufig vorkommt. Das obere Bild zeigt eine Pflanze auf einem schattigen Felsen, das untere ein beblättertes Stämmchen von der Kleidung. Sicherlich benutzte der Mann Moos unter anderem dazu, seinen Proviant einzuwickeln.

C-14-Datierungen von Körpergewebe und Beifunden zeigen einhellig, dass der Gletschermann vor rund 5300 Jahren lebte.

Die Gürteltasche enthielt verschiedenes Werkzeug sowie Feuerzeug. Dazu gehörte Echter Zunderschwamm (unten links). In der Mitte sind kleine Feuersteingeräte zu sehen und rechts ein Stift, um sie zu schärfen.

ENTNOMMEN AUS: „THE MAN IN THE ICE«, VOL. 2, BY K. SPINDLER ET AL. (HG.), DER MANN IM EIS. NEUE FUNDE UND ERGEBNISSE (SPRINGER, WIEN-NEWYORK, 1995) (FINGERNAGEL); KLAUS OEGGL (POLLENKORN, EINKORN); JAMES H. DICKSON (HOPFEN-HAINBUCHE; MOOS; BEBLÄTTERTES MOOSSTÄMMCHEN)

▷ tung beweist eindrucksvoll, wie gut diese Leute mit der Natur vertraut waren und sie zu nutzen verstanden. Die Tiere, Pflanzen, Pilze und Gesteine ihrer engeren Umgebung und deren Verwendungsmöglichkeiten kannten sie genauestens. Auch wussten sie sich Rohstoffe von ferneren Orten zu beschaffen, etwa Silex (Feuerstein) oder Kupfererz. Alles, was Ötzi bei sich hatte, war aus dem jeweils bestgeeigneten Material gefertigt.

Der Mann war gegen Wind und Wetter gut gerüstet. Er hatte sich in drei Lagen Kleidung gehüllt (siehe Bild Seite 38). Beinkleider, Lendenschurz und Oberkleid waren sorgsam aus Rothirsch- und Ziegenfell genäht. Den mantelartigen dichten Umhang hatte man aus Gras und Lindenbast gewirkt – Linden liefern besonders lange, zähe Bastfasern. Dazu trug Ötzi eine Bärenpelzmütze. Auch die dick mit Gras gefütterten Schuhe waren mit Bärenfell besohlt, während das Oberleder aus Rothirschfell bestand, wobei die behaarte Seite innen getragen wurde.

Waffen aus besten Materialien

Ötzi trug ein Beil mit einem Eibenschaft und einer Kupferklinge bei sich. (Die härtere Bronze erfand der Mensch erst später.) Auch besaß er ein Messer – einen kleinen Dolch – mit einer Silex-Klinge und einem aus Eschenholz geschnitzten Schaft. Dieses Holz wird noch heute gern für ähnliche Zwecke genommen, da es nicht leicht splittert. Der für den Dolch verwendete Stein stammte aus den 150 Kilometer weiter im Süden gelegenen Monti Lessini bei Verona.

Das Material des erst halbfertigen langen Bogens des Gletschermanns war

CHRISTIN BEECK, AUS »DIE GLETSCHER-MUMIE«, RGZM

Diese zwei durchbohrten Stücke vom Birkenporling, einem antibiotikahaltigen Pilz, waren auf eine Fellschnur gefädelt.

ebenfalls von erster Qualität: Eibenholz, das sich durch seine besonders hohe Biegsamkeit und Elastizität auszeichnet und noch im Mittelalter für Langbögen verwendet wurde. In einem Fellköcher steckten 14 Pfeile. Allerdings trugen nur zwei davon Feuersteinspitzen und Befiederung, doch diese beiden waren zerbrochen. Dreizehn der Schäfte bestanden aus dem Holz des Wolligen Schneeballs *(Viburnum lantana)*, einer zum Teil auch aus Hartriegel *(Cornus sp.)*. Schneeball treibt sehr harte, dünne und gerade Zweige.

Eine Gürteltasche enthielt ein Feuerzeug: echten Zunderschwamm oder Feuerschwamm – ein harter Baumpilz – sowie Eisenpyrite und einige Feuersteine, mit denen man Funken erzeugen kann. Dazu fand sich ein Retuschierwerkzeug (ein so genannter Druckstab) zum Anschärfen der Feuersteine. Ötzi bewahrte, auf Lederschnüre gefädelt, auch zwei Stücke vom Birkenporling *(Piptoporus betulinus)* auf. Dieser Baumpilz enthält pharmakologisch aktive Stoffe (Triterpene) und könnte damals als Medizin gedient haben. Des Weiteren fanden sich Teile eines Netzes, der Rahmen einer Rückentrage sowie zwei Behälter aus Birkenrinde. Der eine enthielt Holzkohle und Spitzahornblätter. Wie es scheint, hatte der Mann, in Blätter eingewickelt, Glut transportiert.

Woher war dieser Mensch gekommen? In jener Alpengegend verlaufen die Täler nordsüdlich. Seitlich sind sie durch recht unwegsame steil aufragende Bergzüge geschieden. So kann der Gletschermann den Pass eigentlich nur entweder von Norden oder von Süden erstiegen haben. Die Pflanzenfunde verweisen auf das südliche Tal. Dort siedelten am Eingang des Schnalstals, nahe dem mittelalterlichen Schloss Juval, schon in der Jungsteinzeit Menschen. Juval liegt zwar 2500 Meter tiefer als das Hauslabjoch, ist aber in Luftlinie nur zehn Kilometer entfernt. Die Steinzeitsiedlung wurde nicht ausgegraben und auch nicht genauer datiert, doch bei Juval wachsen etliche der Blütenpflanzen und Moose, die sich bei Ötzi fanden. Nichts spricht dagegen, dass sie dort schon vor 5000 Jahren vorkamen, und möglicherweise lebte der Mann dort.

Zu den Pflanzen, die in seiner Kleidung hafteten, gehört auch das Glatte Neckermoos *(Neckera complanata)*. Wie ein paar andere der Moose, die man bei der Mumie fand, wächst es auch in den Tälern nördlich der Fundstelle, nur liegen die südlichen Standorte wesentlich näher. Bei Juval gedeiht dieses Moos reichlich. Nach Untersuchungen von Wolfgang Hofbauer vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen kommt das Moos in geringerer Menge auch bei Vernagt vor. Der Ort liegt 1450 Meter hoch in nur fünf Kilometer Luftlinie südlich vom Fundplatz. Erst vor wenigen Monaten entdeckte Alexandra Schmidl vom Botanischen Institut der Universität Innsbruck im Mageninhalt des Gletschermanns winzige Blattstückchen Echten Wolfsfußes *(Anomodon viticulosus)*. Auch dieses Moos wächst im un-

JAMES H. DICKSON

Am Fundort des Gletschermanns steht heute ein Gedenkstein. Die Leiche lag an der Stelle, wo die drei Männer stehen. Seit die Mumie hier 1991 gefunden wurde, ist die Stelle nie mehr freigetaut. Auch im Jahr 2000, als die Aufnahme entstand, blieb über der Fundstelle eine feste Schneeschicht liegen.

teren Schnalstal, wo es zusammen mit der erstgenannten Art vorkommt.

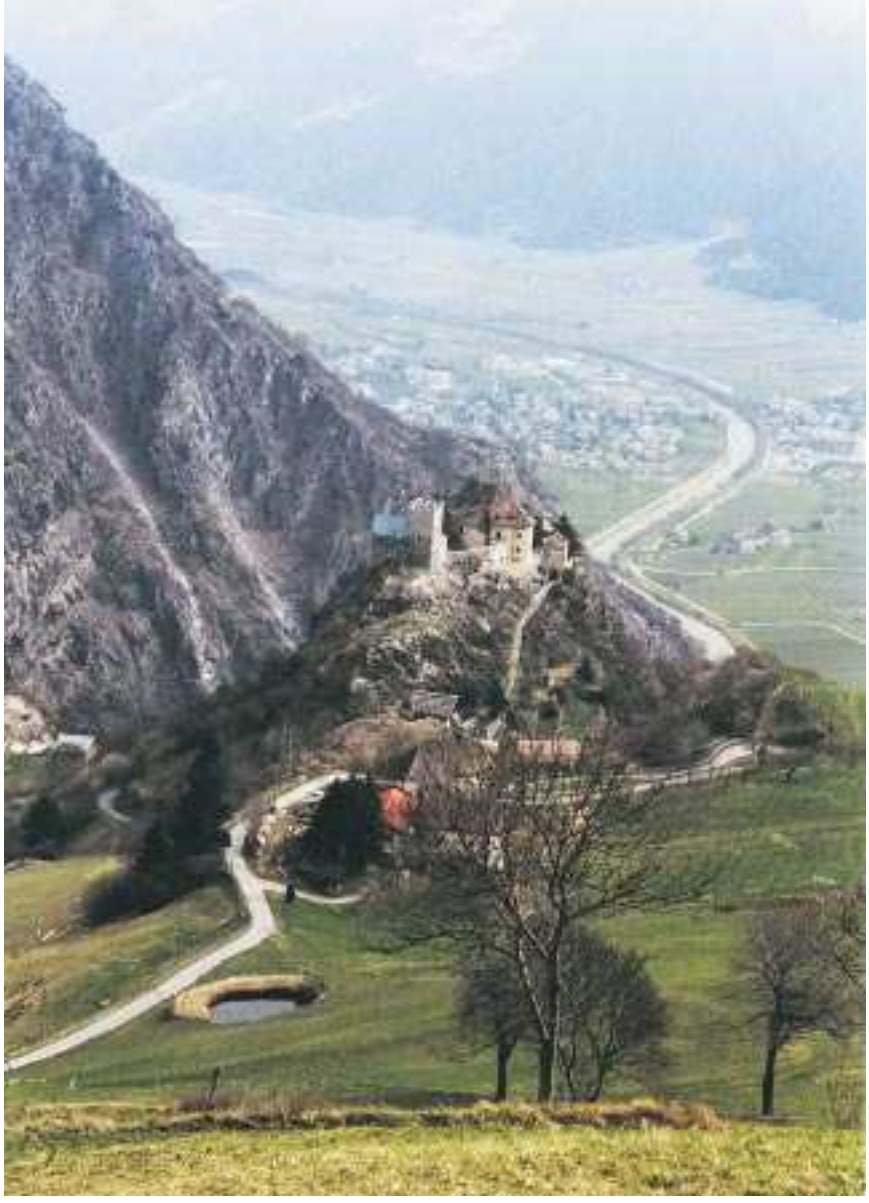
Falls der Eismann nicht bei Juval lebte, könnte er auch im unmittelbar angrenzenden Vintschgau zu Hause gewesen sein, der in der Jungsteinzeit ebenfalls bewohnt war. Im Norden dagegen, vom Ventertal selbst wie vom gesamten Ötztal, gibt es für diese Phase bislang keine Anzeichen menschlicher Behausungen. Die nächsten bekannten jungsteinzeitlichen Siedlungen liegen sehr viel weiter weg als im Süden. Im unteren Schnalstal wie im Vintschgau war das Klima damals sicherlich günstig, denn es war mindestens so warm wie heute. Ötzis Sippe hätte dort kurze, milde Winter mit wenig Schnee erlebt.

Die letzten Mahlzeiten

Allerdings fand Wolfgang Müller von der australischen National-Universität in Canberra, als er den Zahnschmelz untersuchte, dass der Gletschermann in seiner Kindheit und Jugend offenbar in einer anderen Gegend lebte als später im Erwachsenenalter. Genaueren chemisch-physikalischen Untersuchungen weiterer Forscher zufolge scheint er seine letzten Lebensjahre vorwiegend im Ventertal oder benachbarten Nordtiroler Tälern verbracht zu haben. Sollten sich diese Folgerungen, die auf Messungen von Isotopen und Spurenelementen zurückgehen, bewahrheiten, erschiene das Leben des Gletschermanns in ganz neuem Licht.

Sogar was der Mann in seinen letzten Lebenstagen gegessen hatte, ließ sich teilweise rekonstruieren. Da diese Untersuchungen noch laufen, sind von ihnen noch mehr spannende Ergebnisse zu erwarten. Einer von uns (Oeggl) entdeckte im Magen-Darm-Trakt der Mumie winzige Kleiestückchen von Einkorn *(Triticum monococcum)*. Das Getreide, eine ursprüngliche Weizenart, war fein genug zermahlen, um Brot daraus zu backen. Um Grütze zu kochen, wäre so viel Mühe nicht nötig gewesen. Es fanden sich auch mikroskopische Spuren anderer Pflanzen, die Ötzi gegessen haben muss. Sie sind jedoch noch nicht näher bestimmt.

Eine Gruppe um Franco Rollo von der Universität Camerino (Italien) spürte im Darm mit Erbgut-Analysen Rothirsch- und Steinbockfleisch auf. Dicht bei der Leiche lagen Halswirbelsplitter vom Steinbock und auch eine Schlehe *(Prunus spinosa)*. Möglicherweise hatte der Mann die kleinen essbaren, bitteren Früchte, die Ahnen unserer Pflaumen, getrocknet als Proviant mitgenommen. Der Magen-Darm-Trakt enthielt zudem Spuren mehrerer verschiedener Moose, darunter auch ein wenig vom Glatten Neckermoos.



JAMES H. DICKSON

Die Gegend um Schloss Juval am Eingang des Schnalstales in Südtirol wäre der nächste Ort, woher viele der Pflanzen von der Gletschermumie stammen könnten.

Soweit bekannt, pflegten Menschen niemals Moos zu essen. Zumindest stellten diese Pflanzen bestimmt nie ein Grundnahrungsmittel dar. Doch vor 5000 Jahren wurden Verpackungsmaterialien, Wischlappen, Füll- und Dämmstoffe nicht extra fabriziert. Damals entnahm man, was man brauchte, einfach der Natur. Gerade Moos eignet sich vorzüglich für vielerlei Zwecke. Dass die Menschen es noch im Mittelalter auch als Toilettenpapier benutzten, beweisen viele Latrinenfunde. Es mag sein, dass Ötzi sein Essen in Moos verpackt hatte und dann versehentlich etwas davon mitaß.

Das Isotopenverhältnis bestimmter chemischer Elemente in Knochen und Haaren verrät einiges über die Nahrung eines Menschen. So kann der Anteil von Stickstoff-15 anzeigen, in welchem Maße das Essen von Tieren oder Pflanzen herrührte. Der Anteil von Kohlenstoff-13 kann auf die Menge bestimmter Arten von Pflanzennahrung hinweisen. Es lässt auch erkennen, ob ein größerer Teil der Nahrung aus dem Meer stammte.

Passend zu den übrigen Befunden zeigen auch die Isotopenmessungen, dass der Eismann eine gemischte pflanzlich-tierische Kost gewohnt war. Rund dreißig Prozent des Stickstoffs gewann er aus tierischen Proteinen. Ähnlich ernähren sich heutige Sammler- und Jäger-Kulturen.

Ein großes Rätsel bleibt, was der Gletschermann so hoch in den Bergen zu suchen hatte. War er wirklich ein Schafhirte? Seit Menschengedenken treiben ▷

▷ Schäfer im Juni ihre Schafherden aus dem Schnalstal hinauf zu den Hochweiden des Ötztals. Im September bringen sie die Tiere wieder zurück. Die Mumie lag ganz nah bei einem der sicherlich uralten Wege über den Alpenkamm. Trotzdem deutet nichts an Ötzis Kleidung oder Ausrüstung auf einen Schafhirten hin. So trug er keine Wollkleidung. Auch sonst fanden sich weder der typische lange Hirtenstab noch Hinweise auf einen Hütehund, den die Menschen damals schon verwendeten. Zwar tragen Schäfer auf dem Balkan auch heute Mäntel, die dem aus Gras und Bast gewirkten dichten Umhang von Ötzi ähneln. Jedoch war dies damals unseres Wissens die übliche Kleidung Reisender.

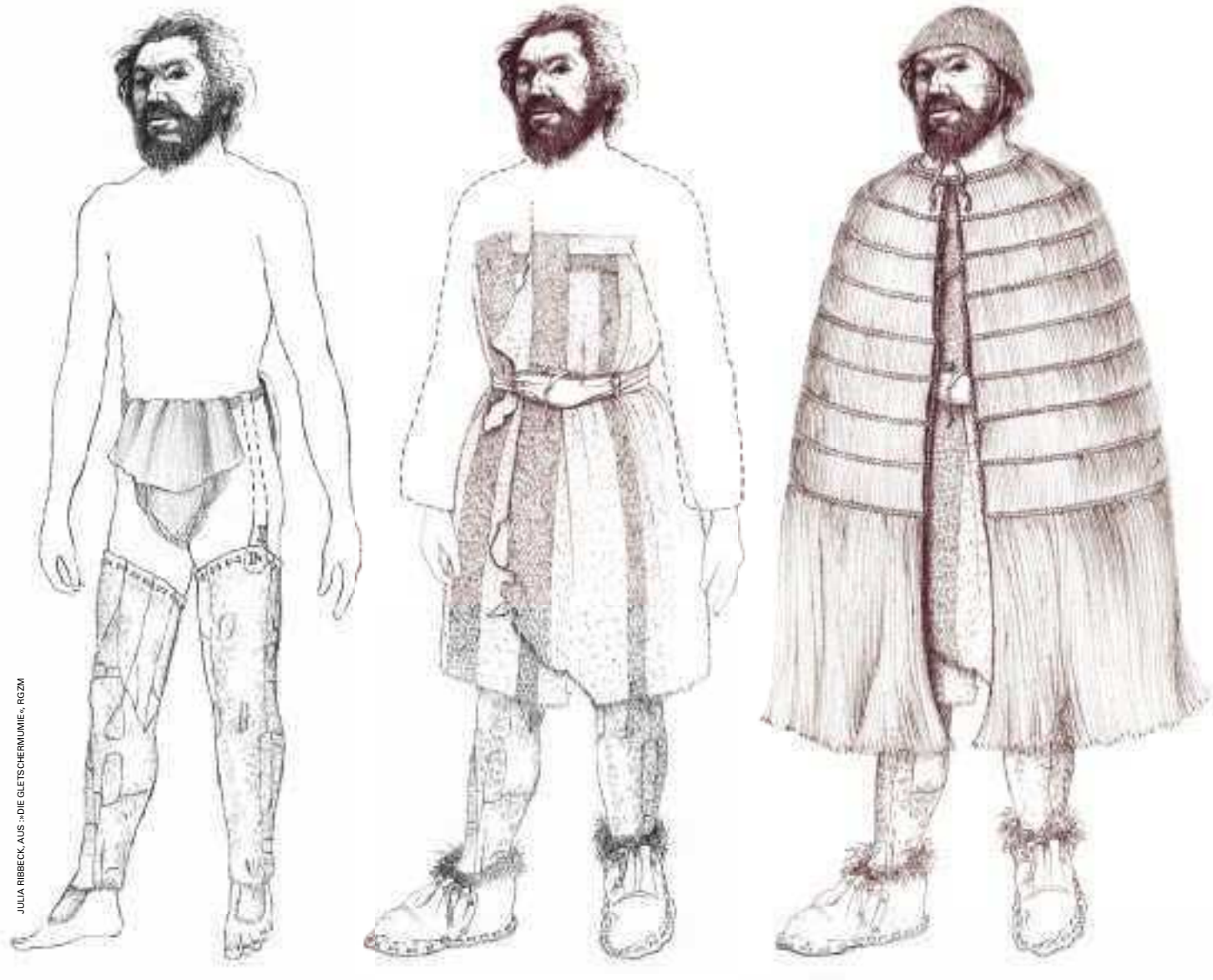
Weil die wenigen erhaltenen Haarbüschel des Mannes Arsen und Kupfer in hoher Konzentration aufweisen, kam die These auf, er habe beim Kupferschmelzen gearbeitet. Geoffrey Grime von der Universität Surrey (England) gibt eine andere Erklärung. Demnach sorgten Metall bindende Bakterien nach dem Tod des Mannes für die hohen Metallwerte. Grime wies nach, dass das Kupfer nicht in den Haaren saß, sondern darauf. Bestärkt wird diese These dadurch, dass am Fundort Kupfermoos *(Mielichhoferia elongata)* wächst, welches kupferhaltiges Gestein bevorzugt.

Eine Zeit lang überlegten die Archäologen, ob der Gletschermann Jäger war und Steinböcken nachsetzen wollte. Immerhin besaß er einen Langbogen und einen vollen Köcher. Doch falls er sich gerade auf der Jagd befand, verwundert, wieso sein Bogen nur halbfertig und nicht bespannt war und auch die Pfeile bis auf zwei im Rohzustand, die beiden fertigen noch dazu zerbrochen waren.

Weil das alles schlecht zusammenpasst, wurde über Ötzis Lebensgeschichte weiter spekuliert. War er auf der Flucht? Oder handelte er mit Feuerstein? Auch als Medizinmann oder als Krieger versuchten ihn manche zu sehen. Keine dieser Erklärungen fußt allerdings auf einer soliden Basis. Höchstens die Stücke Birkenporlings, die medizisch oder spirituell verwendet worden sein können, weisen auf einen Schamanen hin.

Vor zwei Jahren sorgte Ötzis Schicksal für neue Schlagzeilen. Paul Gostner und Eduard Egarter-Vigl vom Bozener Bezirkskrankenhaus erkannten auf Röntgenaufnahmen im Rücken des Mannes

Die Allwetterkleidung des Gletschermanns bestand aus Lendenschurz und Leggins, einer langen Jacke sowie Schuhen, Umhang und Mütze. Archäologen des Römisch-Germanischen Zentralmuseums in Mainz entwarfen diese Zeichnungen, als sie die Kleidungsstücke der Eismumie restaurierten.



JULIA RIBBECK, AUS: »DIE GLETSCHERMUMIE«, RGZM

SÜDTIROLER ARCHÄOLOGIEMUSEUM, ITALIEN

Heute liegt der Gletschermann bei minus sechs Grad Celsius und fast 99 Prozent Luftfeuchtigkeit in einer Klimakammer in Bozen im Südtiroler Archäologiemuseum.

unterhalb der rechten Schulter eine Pfeilspitze. Viele, auch Gostner und Egarter-Vigl, werteten dies als klaren Hinweis, dass der Mann vom Hauslabjoch ermordet worden oder zumindest letztlich den Folgen der Verletzung erlegen war. Von dem angeblichen Fremdkörper existieren mittlerweile plastische Rekonstruktionen. Er ist 27 Millimeter lang und hat 18 Millimeter Durchmesser. Dass es sich wirklich um eine Pfeilspitze handelt, ist allerdings noch nicht erwiesen. Dazu müsste man das Objekt herauspräparieren, und zwar möglichst so fachmännisch, dass sich erkennen lässt, ob die Verwundung wirklich lebensgefährlich war. Entsprechende Anfragen von Vanezis und Tagliaro blieben leider unbeantwortet.

Tod im Frühsommer

Eine abgebrochene Pfeilspitze im Körper muss nicht zum Tode führen. Es gibt viele Beispiele, dass Menschen mit einem Projektil im Leib jahrelang weiterlebten. Ein bemerkenswertes prähistorisches Beispiel dafür ist der berühmte, wegen seiner rassischen Identität rätselhafte Kennewick-Mann aus dem Staat Washington im Nordwesten der USA. Er trug eine steinerne Speer- oder Beilspitze im rechten Beckenknochen. Als er – vor über 9000 Jahren – starb, hatte sich um die Wunde schon neuer Knochen gebildet.

Vor kurzem gab Egarter-Vigl bekannt, der Gletschermann habe an der rechten Hand eine tiefe Schnittverletzung getragen. Die wissenschaftliche Publikation dazu steht noch aus.

Zunächst hieß es, Ötzi sei anscheinend im Herbst gestorben. Das vermuteten Wissenschaftler, weil Schlehen im Spätsommer reifen und in der Kleidung des Mannes zudem Getreidekörner hafteten. Neue botanische Ergebnisse besagen jedoch, dass er höchstwahrscheinlich im späten Frühjahr oder Frühsommer starb. Die winzige Stuhlprobe aus dem Dickdarm, die Oeggl untersuchte, enthielt Pollen der Hopfenbuche, *Ostrya carpinifolia*.

Der kleine Baum wächst in Tallagen südlich des Alpenhauptkamms häufig, kommt im Ötztal dagegen nicht vor. Offensichtlich waren die Pollenkörner zum Todeszeitpunkt frisch gewesen: Die meisten besaßen noch ihren Zellinhalt. Da das Zellinnere normalerweise schnell zerfällt, muss Ötzi die Pollenkörner entweder eingeatmet oder beim Essen mitgeschluckt haben, als Wind sie verbreitete, oder er trank Wasser, auf dem sich der Blütenstaub abgesetzt hatte. Im Schnalstal wächst die Hopfenbuche bis in 1200 Meter Höhe. Sie blüht im späten Frühjahr bis Frühsommer.

Die am Fundort aufgesammelte Schlehe kann, ähnlich Dörrpflaumen, getrocknet gewesen sein und stammte vielleicht vom letzten Herbst. Auch Getreideschrot hält sich fast unbegrenzt. Ötzi könnte die paar Körnchen seit langem in seiner Kleidung gehabt haben.

Ganz besonders mag die neue Ansicht überraschen, dass der Mann anscheinend gar nicht auf dem Felsblock gestorben war, wo er bei der Entdeckung lag. Verschiedenes spricht dafür, dass die Leiche erst später im Schmelzwasser dorthin trieb. Während der letzten 5000 Jahre herrschten in dieser Höhe nachweislich mehrmals wärmere Phasen, in denen das Eis auftauen konnte. Das würde erklären, wieso die rechte Hand des Mannes unter einem Stein verklemmt war und der linke Arm völlig unnatürlich vor der Brust nach rechts ragt. Auch dass sich die Oberhaut lösen konnte, stützt diesen Verdacht. Zudem würde jemand seine Utensilien bei einer Rast wohl nicht im Umkreis von mehreren Metern um sich verteilen, schon gar nicht Kleidungsfetzen.

Auch wenn die Befunde zu Ötzi längst Bücher füllen – auf die Forschung wartet noch immer viel Arbeit. Da sich eine Autopsie der wertvollen Mumie verbietet, werden wir die eigentliche Todesursache wohl nie herausfinden. Dennoch konnten die Pflanzenanalysen den Todeszeitpunkt und den Aufenthalt des Gletschermanns in seinen letzten Lebenswochen und -tagen klären. Spannend bleibt, wo er die verschiedenen Phasen seines Lebens zubrachte. Nicht hoch genug sind die vielen neuen Erkenntnisse über die Menschen jener Zeit zu bewerten, die der Gletschermann vom Hauslabjoch der Wissenschaft schon jetzt lieferte. ◁

James H. Dickson, **Klaus Oeggl** und **Linda L. Handley** untersuchen das beim Gletschermann gefundene Pflanzenmaterial. Dickson ist Professor für Archäobotanik und Pflanzensystematik an der Universität Glasgow. Oeggl, Experte für Archäobotanik, hat eine Botanikprofessur an der Universität Innsbruck. Handley, Ökophysiologin am Schottischen Institut für Getreideforschung in Invergowrie bei Dundee, erforscht die stabilen Kohlenstoff- und Stickstoff-Isotope in Pflanzen und Böden.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Die Gletschermumie aus der Kupferzeit. Neue Forschungsergebnisse zum Mann aus dem Eis. Folio Verlag, Bozen/Wien, und Südtiroler Archäologiemuseum, 1999.

Der Mann im Eis. Von Konrad Spindler. Bertelsmann, München 1993.

Ötzi's Last Meals: DNA Analysis of the Intestinal Content of the Neolithic Glacier Mummy from the Alps. Von Franco Rollo et al. in: Proceedings of the National Academy of Sciences USA, Bd. 99, Heft 20, S. 12594, 1. Okt. 2002.

The Iceman and His Natural Environment. Von Sigmar Bortenschlager und Klaus Oeggl (Hg.). Springer-Verlag, 2000.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

VERHALTENSBIOLOGIE

Schnitzeljagd bei der Waldmaus

Hänsel ließ Steinchen fallen, und so fanden die im Wald ausgesetzten Geschwister beim ersten Mal nach Hause zurück. Einen ganz ähnlichen Trick benutzt die Waldmaus *(Apodemus sylvaticus)*. Bei der Nahrungssuche entfernt sie sich oft bis zu hundert Meter von ihrem Nest. Um trotzdem nicht die Orientierung zu verlieren, legt sie regelmäßig Wegmarken in Form von kleinen Häufchen aus Samenschalen, Zweigen oder Blättern an. Festgestellt haben dies David MacDonald von der Universität Oxford und Pavel Stopka von der Universität Prag. Um ihre Beobachtung abzusichern, machten die Forscher außerdem Tests in einem künstlichen Gehege, in dessen Mitte sie weiße Plastikscheibchen deponiert hatten. Und tatsächlich: Wann immer die Mäuse in größerer Entfernung vom Nest auf Nahrungssuche gingen, platzierten sie zunächst ein solches Scheibchen an ihrem neuen Erkundungsort und benutzten es als Ausgangsbasis für ihre Streifzüge. Auch wenn sie nach einem Alarm ins Loch zurückgeflitzt waren und dann erneut loszogen, peilten sie als Erstes die vorher angelegte Wegmarke an, um von dort aus ihre Suche fortzusetzen. Nach Meinung der Forscher haben solche optischen Orientierungshilfen gegenüber einer Duftmarkierung den Vorteil, dass sie von Räubern oder futterneidischen Artgenossen nicht so leicht erkannt werden und langlebiger sind. *(BMC Ecology, Bd. 3, Nr. 3)*

▶ Auf der Nahrungssuche legt die Waldmaus Wegmarken an.

NATURE PL. / ANDREW HARRINGTON

ARCHÄOLOGIE

Älteste chinesische Schrift

Wo eigentlich der Schädel sitzen sollte, zieren Schildkrötenpanzer das Skelett. Es stammt aus einem über 8000 Jahre alten Massengrab bei Jiahu in der westchinesischen Provinz Henan, in dem seit 1962 unzählige Relikte aus dem neolithischen China ausgegraben wurden. In die Tierpanzer sind Symbole eingraviert, von denen einige den Schriftzeichen für »Auge« und »Fenster« aus der 3000 Jahre alten Shang-Dynastie ähneln. Der Chemiker und Archäologe Garman Harbottle vom Brookhaven National Laboratory in Upton (New York) hält die Grabbeigaben für Vorläufer von beschrifteten Schildkrötenpanzern, welche in der Shang-Dynastie rituell verbrannt wurden. Der Sinologe William Bolz von der Universität von Washington in Seattle vertritt dagegen die Ansicht, dass die elf Zeichen so lange nicht eindeutig als Schrift interpretiert werden können, bis nicht mehr über die damalige Sprache bekannt ist. Bisher galt Mesopotamien als Geburtsstätte der Schrift; die elf nun auf den Schildkrötenpanzern entdeckten Zeichen würden ihre Erfindung um mehr als 2000 Jahre vorverlegen. *(Antiquity, Bd. 77, S. 31)*

▼ Die Schildkrötenpanzer mit Schriftzeichen (links) wurden in einem 8000 Jahre alten Massengrab im chinesischen Jiahu entdeckt.

ANTIQUITY

INSTITUTE OF CULTURAL RELICS AND ARCHAEOLOGY OF HENAN PROVINCE

MEDIZIN

Krebs riechen

Es klingt unglaublich, könnte aber eine Revolution in der Tumordiagnose einläuten: Eine elektronische Nase, konstruiert von Carrado Di Natale und seinen Mitarbeitern an der Universität Rom, vermag am Atem eines Menschen zu erkennen, ob er Lungenkrebs hat – jedenfalls im Spätstadium. Den eindrucksvollen Beweis dafür lieferte ein erster Test im Forlanini-Krankenhaus in Rom: Unter 60 Patienten, die freiwillig teilnahmen, erschnupperte die elektronische Nase genau jene 35, die zur Operation eines Lungentumors eingeliefert worden waren. Die verräterischen Geruchsstoffe sind langkettige Kohlenwasserstoffe und Benzolderivate, die aus noch unbekanntem Grund in der Atemluft der Erkrankten vorkommen. Für ihre Detektion benutzt das Team um Di Natale einen Sensor aus Schwingquarzkristallen, die mit einer bestimmten Sorte von Metalloporphyrinen überzogen sind. Diese absorbieren spezifisch die krebstypischen Atembestandteile, wodurch sich die Eigenschwingung der Kristalle ändert. Der Test dauert nur eine Minute und ist damit nicht nur viel einfacher und weniger belastend als die herkömmliche Bronchoskopie, sondern auch wesentlich schneller. Wenn sich seine Empfindlichkeit steigern lässt, sodass er auch frühere Krebsstadien erkennt, dürfte er sich deshalb für prophylaktische Routineuntersuchungen eignen. *(New Scientist, 10.5.2003, S. 15)*

STAMMZELLFORSCHUNG

Eizellen aus der Petrischale

Embryonale Stammzellen bilden den Stoff, aus dem moderne Medizinerträume sind. Da sie sich noch in jede Art von Gewebe verwandeln können, versuchen Forscher daraus Organe für neuartige Therapien zu züchten. Herz- und Nervenzellen ließen sich so im Tierversuch schon gewinnen. Jetzt machten Karin Hübner und Hans Schöler an der Universität von Pennsylvania in Philadelphia eine sensationelle Entdeckung: Sie beobachteten, wie embryonale Stammzellen im Labor spontan zu Gebilden heranwuchsen, die typische Eigenschaften von Eizellen aufwiesen. Den Beweis lieferte eine fluoreszierende Sonde für ein Gen, das nur in solchen Zellen aktiv ist. Noch ist allerdings unklar, ob sich die künstlich hergestellten Eizellen auch befruchten lassen. Wenn das beim Menschen gelänge, könnte man embryonale Stammzellen in Zukunft ohne Spendermütter produzieren. Das würde nicht nur vielen ethischen Bedenken den Boden entziehen, sondern auch den Mangel an Spender-Eizellen beheben, unter dem die Forscher derzeit leiden. *(Scienceexpress, 1.5.2003)*

K. HÜBNER, H. SCHÖLER

▲ Diese Eizelle hat sich aus embryonalen Stammzellen entwickelt.

GEOLOGIE

Vulkane speien Brom

Chemikalien wie die berüchtigten FCKWs sowie bromhaltige Halone gelten als Schuldige am Abbau der Ozonschicht. Doch jetzt vermuten Forscher um Nicole Bobrowski von der Universität Heidelberg, dass auch Vulkane zu den Ozonzerstörern zählen. Mit einem neuen Gerät, das auf dem Prinzip der differenziellen optischen Absorptionsspektrometrie mit mehreren Achsen (MAX-DOAS) beruht und die Messung von Gaskonzentrationen in der Luft aus der Entfernung erlaubt, stellten sie bei den Soufrière Hills auf der Karibikinsel Montserrat sehr hohe Emissionen an hochreaktivem Brommonoxid (BrO) in der Abgaswolke fest. Hochrechnungen für die gesamte Erde ergaben, dass Vulkane zu den stärksten Bromquellen für die Atmosphäre zählen. Als Oxid kann das Element bei großen Ausbrüchen fast komplett die Stratosphäre erreichen, wo es das Ozon viel wirksamer zerstört als Chlor. Zwar weiß man schon länger, dass Vulkanabgase Bromverbindungen enthalten, doch erst das neue Messgerät erlaubt präzise Abschätzungen. *(Nature, 15.5.2003, S. 273)*

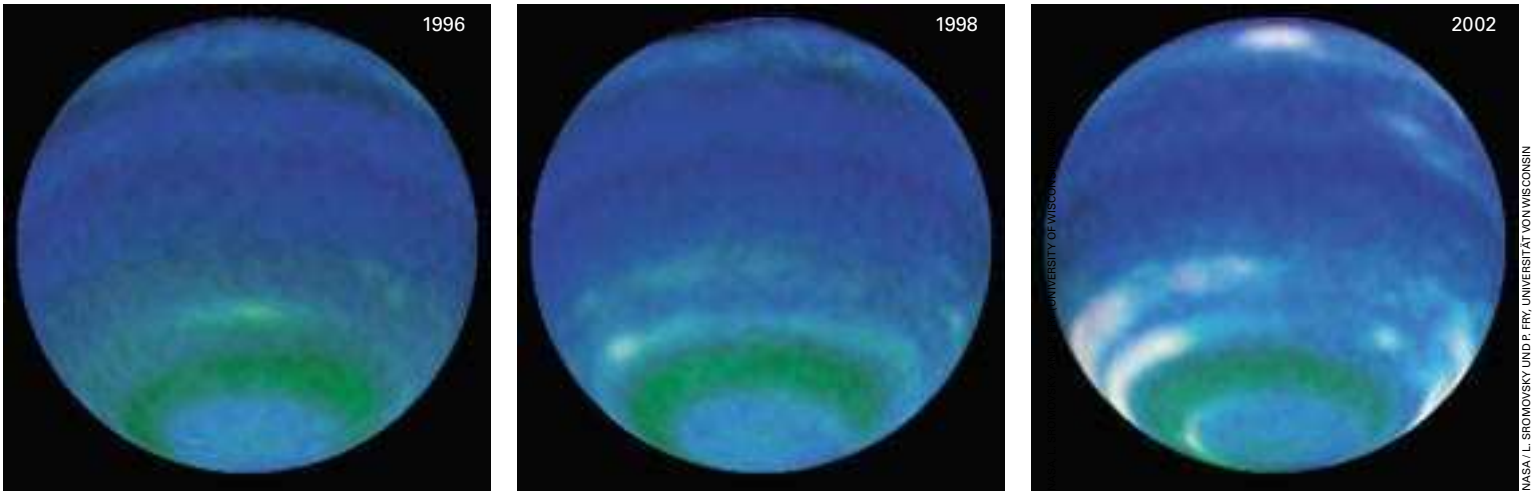
NICOLE BOBROWSKI

▲ Das MAX-DOAS-Spektrometer analysiert aus der Ferne die Abgaswolke des Vulkans Soufrière Hills auf der Karibikinsel Montserrat.

ASTRONOMIE

Frühling auf Neptun

Am Rande des Sonnensystems zieht der Neptun seine einsame Bahn. Rund 30-mal so weit von der Sonne entfernt wie die Erde, erhält er nur etwa ein Tausendstel unserer Ration an Sonnenenergie. Doch das bisschen Wärme reicht offenbar aus, auf dem –130 °C kalten Planeten, dessen Rotationsachse wie bei der Erde gegen die Ebene der Umlaufbahn gekippt ist, Jahreszeiten zu erzeugen. Als Lawrence Sromovsky und seine Kollegen an der Universität von Wisconsin in Madison 1996, 1998 und 2002 den Gasriesen durch das Hubble-Teleskop beobachteten, fiel ihnen ein weißes Wolkenband auf der Südhalbkugel auf, das sich mit den Jahren verbreiterte und immer heller wurde. Dass in Äquatornähe nichts Analoges geschah, bestärkte die Forscher in der Vermutung, dass hier – frei nach Mörike – der Frühling sein weißes Band flattern ließ. Ob auch ein Sommer folgt, zeigt sich erst in rund zwanzig Jahren; denn für einen Sonnenumlauf braucht der Neptun 165 Erdenjahre. *(Icarus, 5/2003, S. 256).*



NASA / L. SROMOVSKY UND P. FRY, UNIVERSITÄT VON WISCONSIN

▼ Ein weißes Wolkenband, das sich von 1996 bis 2002 stetig verbreiterte, kündet vom Kommen des Frühlings auf Neptuns Südhalbkugel.

Die unirdischen Landschaften des

Im Juni sollen drei Sonden zum Roten Planeten aufbrechen, auf der Suche nach Wasser, Mineralien und Lebensspuren. Die Oberfläche unseres Nachbarn im All zeugt jedenfalls von vielfältigen Aktivitäten.

MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON WWW.NIRGAL.NET/SCHEMAS/SCHIAPARELLI_MAP.HTML

Von Arden L. Albee

Seit Erfindung des Teleskops hat der Mars die Neugier der Forscher und die Fantasie der Öffentlichkeit auf sich gezogen. Die dunklen Areale und schmalen Streifen, die der italienische Astronom Giovanni Schiaparelli 1877 auf dem »Roten Planeten« entdeckte, hielten manche Wissenschaftler für Ozeane und künstliche Kanäle. So nimmt es nicht wunder, dass die Autoren utopischer Romane sich ihr eigenes Bild von der Oberfläche des Himmelskörpers und seiner Bewohner machten:

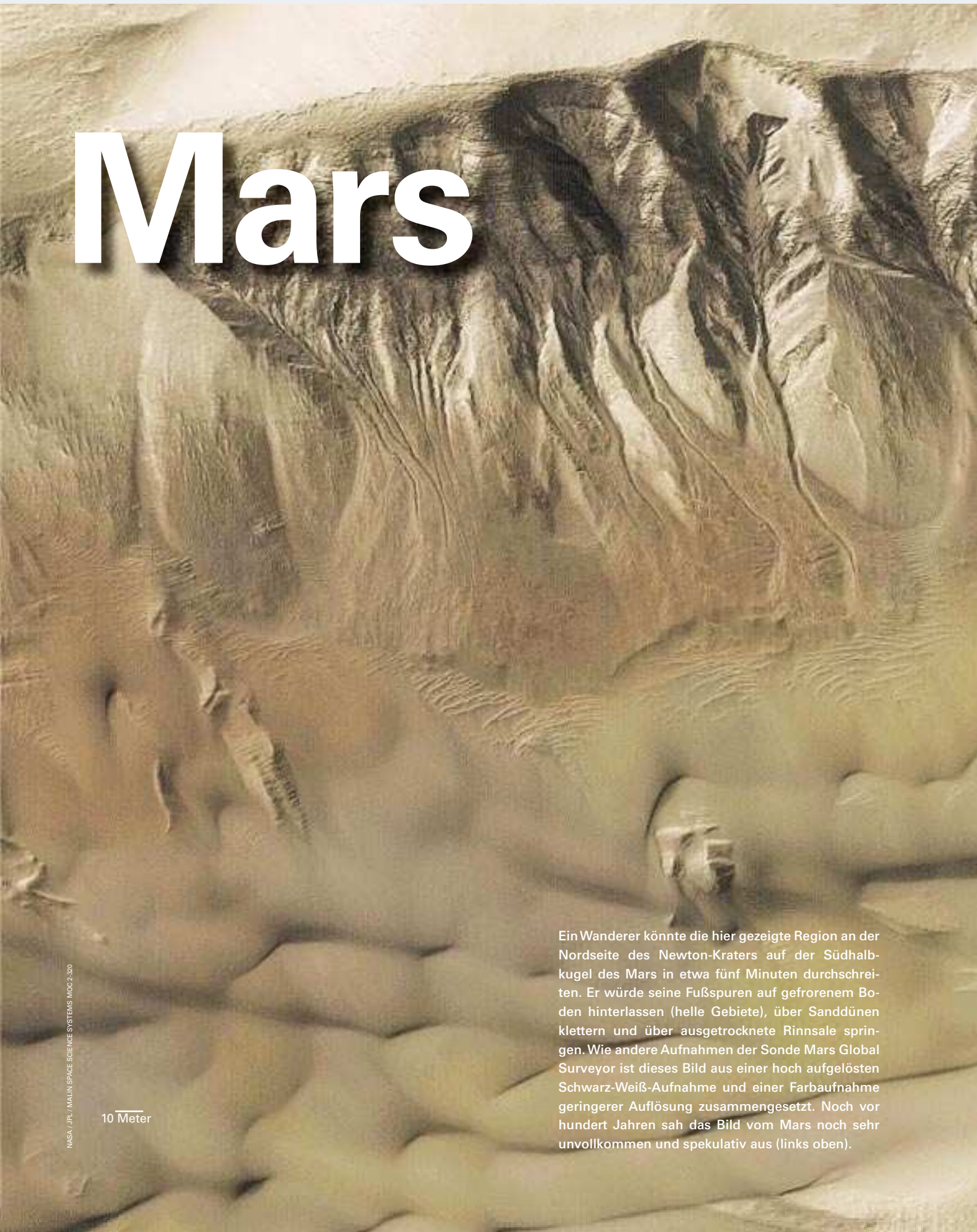
»Die hellen Teile sind teils sandige, teils felsige Hochplateaus, trockene und fast vegetationslose Gegenden, in denen sich nur spärliche Ansiedlungen zur Gewinnung der Mineralschätze des Bodens befinden. Dicht bevölkert dagegen sind die dunklen Teile, deren Erdreich von Feuchtigkeit durchdrungen und mit einem üppigen Pflanzenwuchs bedeckt ist«, schrieb Kurd Laßwitz, der als Vater der deutschen Science-Fiction-Literatur gilt, in seinem 1897 veröffentlichten Roman »Auf zwei Planeten«. Sein US-Kollege Edgar Rice Burroughs, hier zu Lande hauptsächlich als Verfasser der Tarzan-Romane bekannt, ließ seinen Helden John Carter zahlreiche Abenteuer mit sechsgliedrigen Wesen und hübschen Prinzessinnen auf unserem Nachbarplaneten bestehen. Die Meere dort sind ausgetrocknet, Wasser gibt es nur noch in den Kanälen und die Atmosphäre wird künstlich aufrechterhalten. Eine Vielzahl von Stämmen durchstreift die aride Landschaft und führt einen »harten und erbarmungslosen Überlebenskampf auf einem sterbenden Planeten«, wie Burroughs in seinem ersten von insgesamt elf John-Carter-Romanen schrieb.

Trostlose Kraterwelten

Auch wenn Wissenschaftler und Autoren vor einem Jahrhundert die Umweltbedingungen auf dem Mars als extrem einstuften, so orientierten sie sich doch meist an irdischen Vorbildern. Aber die Vorstellung, die Oberfläche des recht kleinen und kalten Planeten könnte durch ähnliche Prozesse wie auf der Erde gestaltet sein, erlitt Ende der 1960er Jahre einen Rückschlag: Die Bilder der ersten Raumsonden zeigten eine trostlose, mit Kratern übersäte Welt ähnlich unserem Mond. Als dann in der Folge riesige Vulkanberge, tiefe Schluchten und komplexe Witterungserscheinungen entdeckt wurden, schienen sich doch wieder Ähnlichkeiten zwischen Mars und Erde zu ergeben. Die Aufnahmen der Viking-Sonden Mitte der 1970er Jahre und der Mars-Pathfinder-Mission 1997 zeigten vertraute Ansichten einer Staub- und Geröllwüste. Wie Burroughs vergleichen Wissenschaftler die Äquatorgebiete des Mars gern mit den trockenen Zonen im Südwesten der USA. Die Polargebiete scheinen hingegen den Trockentälern der Antarktis zu ähneln, in denen sich das Eis über schier endlose Weiten erstreckt.

Wenn aber die Forscher etwas aus den jüngsten Marsmissionen gelernt haben, dann eines: Derartige Vergleiche sind mit Vorsicht zu genießen. In den letzten fünf Jahren haben Raumsonden mehr Informationen über den Roten Planeten zusammengetragen als in den Jahrzehnten zuvor. Als Folge des neuen Datenmaterials mussten die Wissenschaftler ihre Vorstellungen vom Mars gründlich revidieren. Selbst die brennendste Frage – war Mars früher wärmer und feuchter, sodass sich auf ihm womöglich Leben entwickeln konnte? – muss viel nuancierter gestellt werden, als man dachte. Um den Mars zu verstehen, dürfen sich die Planetologen nicht von ihrem Wissen um die Erde blenden lassen. Der Rote Planet ist eine Welt für sich. ▷

Mars



10 Meter

NASA / JPL / MALIN SPACE SCIENCE SYSTEMS MOC 2-320

Ein Wanderer könnte die hier gezeigte Region an der Nordseite des Newton-Kraters auf der Südhalbkugel des Mars in etwa fünf Minuten durchschreiten. Er würde seine Fußspuren auf gefrorenem Boden hinterlassen (helle Gebiete), über Sanddünen klettern und über ausgetrocknete Rinnsale springen. Wie andere Aufnahmen der Sonde Mars Global Surveyor ist dieses Bild aus einer hoch aufgelösten Schwarz-Weiß-Aufnahme und einer Farbaufnahme geringerer Auflösung zusammengesetzt. Noch vor hundert Jahren sah das Bild vom Mars noch sehr unvollkommen und spekulativ aus (links oben).

Die Programme zur Erforschung des Mars haben Höhen und Tiefen erlebt. Allein die Nasa hat im letzten Jahrzehnt drei Sonden verloren: Mars Observer und Mars Climate Orbiter, die beide nicht auf die vorgesehene Mars-Umlaufbahn einschwenkten, sowie Mars Polar Lander, der beim Landeanflug zerschellte. Auch die sowjetischen Doppelsonden Phobos 1 und 2 waren Ende der 1980er Jahre kurz vor der Ankunft am Roten Planeten verloren gegangen. Die multinationale Sonde Mars 96 scheiterte bereits beim Start im November 1996.

Trotz dieser Pannenserie gab es auch beeindruckende Erfolge zu verzeichnen. Der Mars Global Surveyor liefert seit 1997 Bilder, Infrarotspektren und andere Daten aus einer Marsumlaufbahn. Zu ihm gesellte sich später die Sonde Mars Odyssey, die Anfang 2002 mit der systematischen Beobachtung begonnen hat. Aufgabe dieser Mission ist es, nach Wasser unter der Marsoberfläche zu suchen und Infrarotaufnahmen der Oberfläche zu gewinnen. Mit dem Mars Pathfinder und seinem Roboterfahrzeug Sojourner glückte 1997 erstmals nach 21 Jahren wieder eine Landung auf unserem Nachbarplaneten (siehe Spektrum der Wissenschaft 9/1998, S. 62). Die japanische Raumsonde Nozumi, seit 1998 unterwegs, soll im kommenden Dezember in eine Mars-Umlaufbahn einschwenken. Im gleichen Monat soll die europäische Sonde Mars Express mitsamt einer kleinen Landeeinheit namens Beagle dort eintreffen; der vorgesehene Starttermin fällt mit dem Redaktionsschluss dieses Heftes zusammen. Zur gleichen Zeit werden zwei Landefahrzeuge der Nasa unterwegs sein, die Mars Exploration Rover A und B (siehe Kasten auf Seite 47). Ihre Landung ist für Januar 2004 vorgesehen.

Dank der Datenflut, die von den aktiven Sonden übermittelt wird, können die Wissenschaftler so gut wie nie zuvor die Umweltverhältnisse auf der Oberfläche und in der Atmosphäre des Mars studieren. Auch über prägnante Formationen wie Krater, Canyons und Vulkane, die in der Urzeit des Planeten entstanden, liegen umfassende Erkenntnisse vor. Doch was in den Jahrmilliarden dazwischen geschah, ist im Wesentlichen unbekannt. Niemand vermag zu sagen, welche Bedingungen und Prozesse zu dem heutigen Erscheinungsbild des Mars geführt haben.

Mars, so wie er heute ist, unterscheidet sich in einigen wesentlichen Punkten von der Erde. Da wäre zunächst einmal die Staubschicht zu nennen. Während das Oberflächenmaterial unseres Heimatplaneten aus der chemischen Verwitterung der darunter liegenden Gesteinsschichten oder der eiszeitlichen Geröllmassen entstanden ist, bedeckt den Mars eine dicke Schicht aus feinkörnigem Staub. Winde verteilen ihn über den gesamten Planeten. Selbst die höchsten Vulkane sind damit eingehüllt. Die staubigsten Gebiete entsprechen den hellen Bereichen, die irdische Beobachter im Teleskop sehen können.

Sonne, Wind und Frost formen die Oberfläche

Staub ruft fremdartige Landschaften hervor wie etwa Zonen mit ausgeprägten Vertiefungen, die einem Schweizer Käse nicht unähnlich sind. Wenn sich die aufgewirbelten feinen Partikel wieder absetzen, schließen sie leichtflüchtige Substanzen ein, sodass sich eine Schicht aus vereistem Staub bildet. Durch spätere Erwärmung verflüchtigt sich das Eis, wobei das ausströmende Gas die typischen runden Vertiefungen zurücklässt. Die Dicke der frostigen Staubschicht variiert mit den Breitenzonen: Wie die Befunde der Mars-Odyssey-Mission zeigen, können in der Nähe der Marspole bis zu fünfzig Zentimeter der obersten Bodenschicht aus Eis bestehen. In Hanglagen sieht es so aus, als wäre diese Eismasse wie eine zähe Flüssigkeit hinuntergeflossen, ähnlich wie wir es von irdischen Gletschern her kennen. Diesen Eisschichten wendet sich die Forschung zurzeit besonders intensiv zu.

Die Schichtstrukturen in diesem Terrain wirken fast wie Höhenlinien auf einer topografischen Karte. Das von Mars Global Surveyor aufgenommene Bild zeigt ein Areal im Westteil von Candor Chasma, einer Schlucht innerhalb des riesigen Valles-Marineris-Grabensystems. Die einzelnen Schichten, jede etwa zehn Meter dick, könnten Sedimente sein, die vermutlich vor Entstehung des Grabensystems durch Wasser abgelagert wurden. Eine alternative Erklärung wäre Staub, der durch zyklische Vorgänge in der Atmosphäre deponiert wurde.

Eine zweite Besonderheit sind die extremen Windverhältnisse auf dem Mars. In gewisser Weise prägen die Luftbewegungen den Planeten ähnlich, wie es auf der Erde Regen und Oberflächenwasser tun. Raumsonden haben Staubstürme beobachtet, die den gesamten Planeten einhüllen, riesige Staubwirbel (so genannte *dust devils* oder Staubteufel) sowie Staublawinen. Die Staubablagerungen auf der windabgewandten Seite von Hindernissen verändern sich im Laufe der Jahreszeiten, vermutlich weil die Windverhältnisse entsprechend variieren.

Dort, wo die Oberfläche staubfrei ist, finden sich im Allgemeinen Spuren von Winderosion und -ablagerung. Hinweise für Erosion zeigen sich auch an Kratern, aus denen offenbar Material ausgeblasen wurde, und an so genannten Yardangs, Felsstrukturen, die durch Wind- und Sandschliff entstanden sind. Ablagerungsprozesse lassen sich unter anderem an Sandflächen und -dünen erkennen. Die Dünen bestehen aus sandkorngroßen Partikeln, die vom Wind auf charakteristische Weise transportiert werden: Die Körner werden von der Strömung hochgerissen und sinken dann aufgrund von Wirbeln und der Schwerkraft wieder ab. Dieser sprungweise Transport, Saltation genannt, lässt die Sandkörner über den Boden hüpfen. Auf diese Weise befindet sich immer ein Teil des Sandes in der Schwebe. Da die Saltation geringere

IN KÜRZE

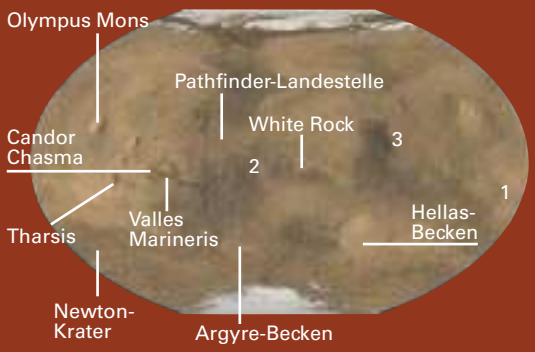
Die Oberfläche des Mars

In den letzten Jahren haben Raumsonden Indizien dafür geliefert, dass Fließgewässer, Eis und Wind die Oberfläche des »Roten Planeten« seit seiner Frühzeit geformt haben. Die **geologischen und meteorologischen Prozesse** auf dem Mars ähneln nur zum Teil denjenigen auf der Erde. Deshalb hilft das Wissen um die irdischen Vorgänge allein nicht weiter.

Die Frage, ob der Mars einst **lebensfreundliche Bedingungen** aufwies, ist heute nicht einfacher zu beantworten als früher. Es gibt sowohl Hinweise dafür wie auch dagegen. Von den Messgeräten an Bord neuer Marsmissionen, die in wenigen Monaten dort landen sollen, erhofft man sich weitere Erkenntnisse darüber.

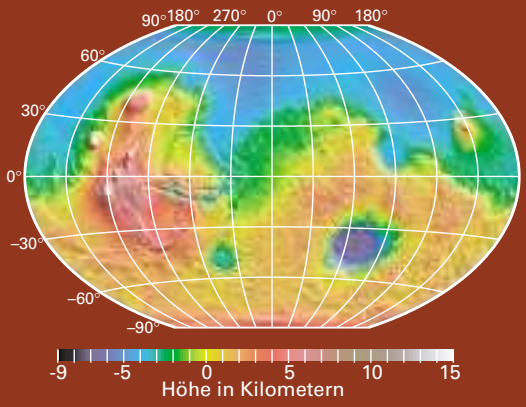
NASA / JPL / MALIN SPACE SCIENCE SYSTEMS MOC 2-259
100 Meter

Verschiedene Ansichten des Mars

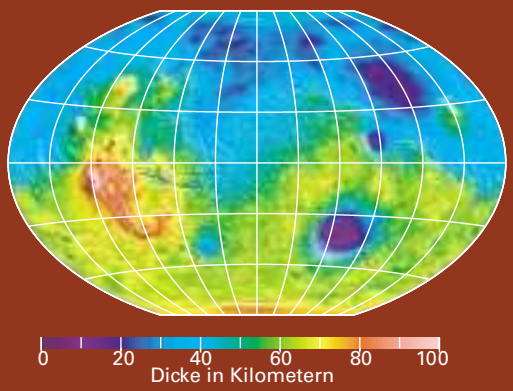


Landestellen: Gusev-Krater (1), Meridiani Planum (2), Isidis Planitia (3)

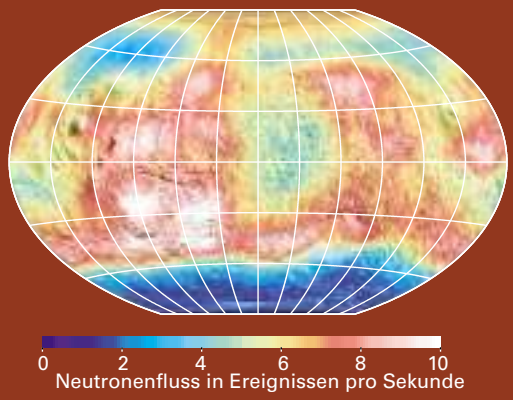
Die Oberfläche des Mars ist in vier Zonen strukturiert: das kraterübersäte südliche Hochlandgebiet (mit Flussbettstrukturen), das glattere nördliche Tiefland (mit Zeichen einer früheren Küstenlinie), die Äquatorzone (mit Vulkanen und Canyons) und die Polarkappen (mit veränderlichem Terrain).



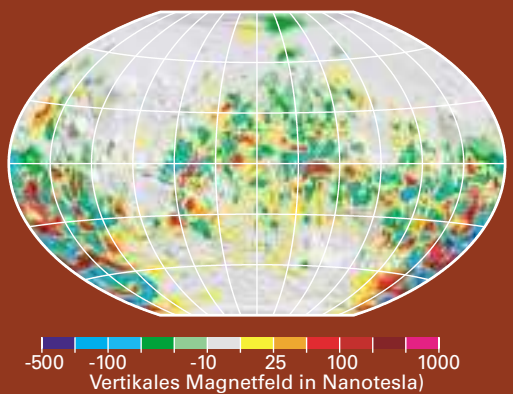
Die Topografie ist einzigartig: Zwischen den tiefsten Becken (dunkelblau) bis zu den höchsten Vulkanen liegt ein Höhenunterschied von dreißig Kilometern. Auf der Erde sind es nur zwanzig Kilometer. Das runde Hellas-Becken auf der Südhemisphäre ist einer der größten Einschlagkrater in unserem Sonnensystem.



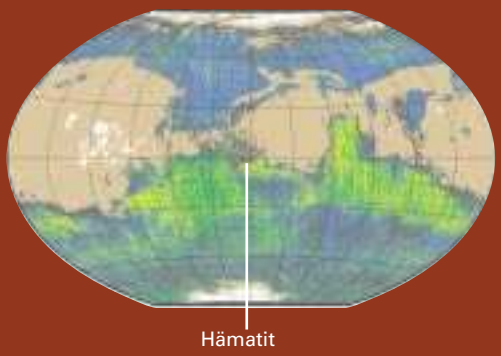
Die Dicke der Kruste lässt sich aus der topografischen Karte und dem gemessenen Schwerefeld berechnen. Unter der nördlichen Ebene ist die Kruste vierzig Kilometer dick, unter den südlichen Hochländern siebzig Kilometer. Besonders dick (rot) ist sie unter den Vulkanen in der Tharsis-Region.



Der Wassergehalt in der obersten, etwa einen Meter dicken Bodenschicht verrät sich mithilfe von Neutronen mittlerer Energie, die entstehen, wenn kosmische Strahlung auftrifft. Die Energie der Neutronen wird von dem Wasserstoff im Wasser absorbiert. Ein geringer Neutronenfluss bedeutet wasserreiches Material.



Ein globales Magnetfeld hat der Mars zwar nicht, doch sind Teile der Kruste zehnmal stärker magnetisiert als auf der Erde. Eisenkristalle haben sich dort wie kleine Stabmagnete ausgerichtet – ein Hinweis darauf, dass es ein globales Feld gab, als sich das schmelzflüssige Gestein verfestigte.



Die Geologie kann man aus Infrarotspektren erschließen. Basalt (grün) kommt hauptsächlich im Süden vor, Andesit (blau), ein komplexeres Vulkangestein, im Norden. Am Äquator gibt es Zonen mit Hämatit (rot), das sich in der Gegenwart von Wasser bildet. Staub (hellbraun) verdeckt vielerorts den Gesteinsuntergrund.

▷ Windgeschwindigkeiten erfordert als ein direktes Hochwehen von Staub in die Atmosphäre, ist der größte Teil des aufgewirbelten Staubes auf diesen Prozess zurückzuführen.

Die Kraft des Windes scheint den Planeten seit der Frühzeit des Sonnensystems geformt zu haben, als ein heftiges Bombardement von Trümmern die Krater erzeugte. Auf zahlreichen Marsaufnahmen sind Krater mit unterschiedlichem Erosionsgrad zu sehen: Einige sind flach und teilweise mit Ablagerungen und Sanddünen gefüllt, andere hingegen erscheinen in ihrer ursprünglichen Form, tief und napfförmig. Womöglich ist das auf eine Abfolge von Prozessen zurückzuführen: Verwehter Sand sammelt sich nach und nach in Kratern, und im Laufe der Zeit kommen neue Krater hinzu. Wo und wie eine solche Sandmenge erzeugt worden ist und wie sie verfrachtet wurde, bleibt allerdings noch ein Rätsel.

Ein dritter Unterschied zwischen Mars und Erde betrifft das Wetter. Manche der Wetter- und Klimazyklen auf dem Mars ähneln denen auf unserem Heimatplaneten, während andere kein bekanntes Vorbild haben. Die Ursache ist letztlich in den Bahnparametern zu suchen. Während die Tageslängen und die Neigungen der Rotationsachsen beider Planeten fast übereinstimmen, dauert ein Marsjahr 687 Erdentage. Ein Wasserkreislauf, wie er auf der Erde das Wetter maßgeblich bestimmt, fehlt auf dem Mars völlig. Der Atmosphärendruck (der nur ein Prozent des irdischen Wertes beträgt) schwankt im Laufe der Jahreszeiten um 25 Prozent. Dies ist eine Folge des periodischen Ausfrierens beziehungsweise Sublimierens von Kohlendioxid an den Marspolen. Die dünne Atmosphäre hat eine sehr kleine Wärmekapazität, sodass die Temperaturen im Tagesverlauf um über hundert Grad Celsius schwanken. Die thermischen Eigenschaften der dünnen Atmosphäre werden stark durch ihren Gehalt an Staub- und Eispartikeln beeinflusst. Deswegen weist die Atmosphäre trotz ihrer geringen Dichte komplexe Strömungsverhältnisse auf. Ein Tageswetterbericht auf dem Mars könnte folgende Phänomene beinhalten: starke Winde, Eiswolken in der oberen Atmosphäre, Nebel in tieferen Luftschichten, Frost auf der Winterhalbkugel, Staubteufel und heftige Sandstürme.

Wie auf der Erde können Sturmsysteme von der nördlichen Polarregion spiralförmig südwärts wandern. Aber die heftigsten Staubstürme setzen üblicherweise während des Frühlings auf der Südhalbkugel ein, wenn sich der Planet relativ rasch erwärmt. Diese Stürme weiten sich regelmäßig aus, vereinigen sich und hüllen schließlich den gesamten Planeten ein. Die Sonde Mars Global Surveyor beobachtete die Entwicklung eines vier Monate währenden globalen Sandsturms, der im Juni 2001 einsetzte. Entgegen den Erwartungen der Wissenschaftler war es nicht ein einziger Sandsturm, sondern ein Gemenge mehrerer regional tobender Stürme. Michael Malin, der Leiter des Unternehmens, das die Kamera der Raumsonde betreibt, verglich die klimatischen Auswirkungen dieser enormen Staubmengen in der Marsatmosphäre mit den Folgen des Pinatubo-Ausbruchs 1991 auf der Erde, der eine kurzzeitige, aber weiträumige Abkühlung auslöste.

Feucht und doch trocken

Den polaren Eiskappen kommt eine Schlüsselrolle im atmosphärischen Kreislauf zu. Ihre Größe und Form weist darauf hin, dass sie hauptsächlich aus Wassereis bestehen und nicht aus Trockeneis (gefrorenem Kohlendioxid). Trockeneis ist nämlich nicht so stabil wie Wassereis und kann nicht die beobachtete kuppelförmige Gestalt annehmen. Eine wichtige neue Entdeckung ist, dass sich die Trockeneisschicht, die einen Großteil der südlichen Polkappe bedeckt, relativ schnell verflüchtigt.

Natürlich kann dieser Prozess nicht unbegrenzt andauern. Auch die Staubquellen und -senken können nicht ewig in ihrem jetzigen Zustand bleiben. Damit sich das Eis und der Staub erneuern können, müssen noch andere zyklische Prozesse ablaufen. Diese sind möglicherweise mit Schwankungen der Marsbahn verbunden. Malin und sein Kollege Kenneth Edgett vermuten, dass die heutigen Windverhältnisse weniger stark ausgeprägt sind als in der jüngeren Geschichte des Planeten. Wenn das zutrifft, wäre das ein weiterer Hinweis auf eine Veränderung des Marsklimas.

Ein vierter wichtiger Unterschied zwischen Erde und Mars ist das Verhalten flüssigen Wassers. Unter den gegenwärtigen Druck- und Temperaturverhältnissen auf dem Mars ist flüssiges Wasser instabil. Niederschläge gibt es nicht. Dennoch kann Wassereis in einer gewissen Tiefe des Marsbodens das ganze Jahr über oder nahezu das ganze Jahr über existieren. Wie auf der Erde, so gibt sich auch auf dem Mars eishaltiger Boden durch bestimmte Oberflächenstrukturen zu erkennen. Die Sonde Mars Odyssey hat fast überall außerhalb der Äquatorialzonen Bodeneis entdeckt, und Modelle ▷

MARS ORBITER LASER ALTIMETER SCIENCE TEAM, MALIN SPACE SCIENCE SYSTEMS (ECHTFARBENMOSAIK); ODED AHARONSON / CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY (ALLE ANDEREN MOSAIKEN); QUELLE: MARS ODYSSEY (WASSER); PHILIP CHRISTENSEN / ARIZONA STATE UNIVERSITY (GEOLOGIE); MARS GLOBAL SURVEYOR MISSION (ALLE ANDEREN MOSAIKEN)

Geologische Kundschafter

Roboter erkunden den Mars

Um den Jahreswechsel 2003/2004 herum wird der Rote Planet Besuch von drei Landefahrzeugen bekommen. Diese Roboter sollen die geologische Geschichte der Landeplätze erkunden sowie die mögliche Rolle von Wasser und die Klimageschichte herausfinden.

Die Landeplätze wurden anhand von Detailaufnahmen ausgewählt, die von den marsumkreisenden Raumsonden stammen. Für die Auswahl mussten das geologische Interesse und die möglichen Risiken (durch Abhänge und heftige Winde) gegeneinander abgewogen werden. Die beiden Nasa-Roboter, Mars Exploration Rover 1 und 2, sollen im Gusev-Krater, dessen geschichteter Boden aus Meeressedimenten bestehen könnte, beziehungsweise im Meridiani Planum, wo man das in feuchter Umgebung gebildete Mineral Hämatit zu finden hofft, niedergehen. Das Landefahrzeug der Esa, Beagle 2, soll in Isidis Planitia aufsetzen, einem durch Sedimentation entstandenen Becken.

NASA ARTIST CONCEPT / MARS EXPLORATION PROGRAM

So sollen die Mars Explorer Rover der Nasa die Marsoberfläche erkunden.

lassen vermuten, dass das Eis in beträchtliche Tiefen reicht.

Gelegentlich kann flüssiges Wasser die Oberfläche erreichen. Im Jahr 2000 wurden frische Rinnen entdeckt, die aussehen, als seien sie durch ablaufendes Wasser entstanden. Die begeisterten Wissenschaftler entwickelten mehrere Theorien, um sie zu erklären: leckende Wasseradern (die unerklärlich hoch auf Kraterrändern verlaufen würden), Wassergeysire, Ausbrüche von unter hohem Druck stehendem Kohlendioxid-Gas und vulkanische Aktivität. Anfang 2003 schließlich entdeckte Philip Christensen von der Staats-Universität von Arizona Rinnen, die eindeutig unterhalb eines Schnee- und Eisfeldes verlaufen. Er vermutet, dass solche Erscheinungen mit den Klimazyklen verbunden sind. In Kälteperioden überziehen sich Hänge mit einer Schicht aus Eis und Staub. Sonnenlicht durchdringt diese isolierende Schicht und erwärmt sie so weit, dass an ihrer Unterseite Wassereis schmilzt und als Rinnsal den Hang hinabfließt. In wärmeren Phasen schmilzt oder verdampft die Schicht vollständig, sodass die Rinnen frei liegen.

Trotz des Vorkommens von Wasser ist der Mars ein trockener Planet. Seine Mineralogie ist die einer fast wasserlosen Oberfläche. Auf der Erde entstehen durch die Einwirkung warmen flüssigen Wassers verwitterte, quarzreiche Böden, hydrathaltiger Lehm und Salze wie Calciumcarbonat und -sulfat; der Sand an Stränden oder in Dünen besteht hauptsächlich aus Quarz. Auf dem Mars hingegen haben die Raumsonden noch keine Ablagerungen dieses Minerals gefunden. Die dunkleren Dünen auf dem Roten Planeten sind basaltisch und enthalten meist Minerale wie Pyroxen und Plagioklas, die auf der Erde vollständig verwittern würden. Daraus folgt, dass die gegenwärtigen kalten und trockenen atmosphärischen Bedingungen auf dem Mars bereits seit langer Zeit andauern.

Hat sich der Mars schon immer so sehr von der Erde unterschieden? Unter den Schichten aus Staub und Sand sind zahlreiche Hinweise verborgen, dass sich der Rote Planet im Laufe der Zeit gewandelt hat. So weist er eine deutliche Zweiteilung der Landschaften zwischen der nördlichen und der südlichen Hemisphäre auf. Das Terrain auf der südlichen Hemisphäre liegt viel höher und ist stark mit Kratern durchsetzt (was auf eine alte Oberfläche hinweist). Die nördliche Hemisphäre besteht aus einer ausgedehnten Tiefebene mit weniger Kratern (was auf eine jüngere Oberfläche hinweist). Dazwischen liegt das riesige Tharsis-Plateau mittleren Alters, das die größten Vulkane des Sonnensystems enthält. Auf den neuesten hoch aufgelösten Bildern dieser Vulkane hat James W. Head von der Brown-Universität Strömungsmuster gefunden, die Gebirgsgletschern verblüffend ähneln – ein Indiz für das Vorhandensein von Eis unter einer Gesteins- und Staubschicht.

Relikte eines frühen Ozeans?

Das nördliche Tiefland ist bemerkenswert flach, was vermuten lässt, dass es während einer längeren Epoche der Marsgeschichte der Boden eines Meeres war. Es scheint mit mehreren Schichten aus Ergussgestein und Sedimenten bedeckt zu sein, die aus dem Süden stammen. Neuere topografische Detailkarten haben Krater enthüllt, die offenbar Teil einer alten Oberfläche und von einer dünnen Schicht jüngerer Ablagerungen bedeckt sind.

Entlang dem Rand der südlichen Hochländer befinden sich Strukturen, die nur durch flüssiges Wasser entstanden

Zwei Späher im Orbit

Umfassende Überwachung des Mars

Die beiden Sonden Mars Global Surveyor und Mars Odyssey umrunden den Planeten auf polaren Umlaufbahnen. Diese sind im Raum stabil, sodass sich der Planet langsam unter ihnen hindurchdreht. Auf diese Weise können die Bordsensoren die gesamte Oberfläche streifenweise abtasten. Die kontinuierliche Beobachtung erlaubt es zudem, Veränderungen auf der Oberfläche, in der Atmosphäre sowie im Schwere- und im Magnetfeld des Planeten festzustellen.

Global Surveyor hat fünf Hauptinstrumente. Ein Laser-Höhenmesser tastet die Topografie des Planeten mit einer Höhengenauigkeit von fünf Metern ab. Damit ist der Mars genauer kartiert als die meisten Regionen der Erde. Eine Kamera fertigt Farbaufnahmen mittlerer Auflösung an sowie Schwarz-Weiß-Aufnahmen hoher Auflösung. Ein Bildelement entspricht 1,4 Metern auf der Marsoberfläche. Ein Michelson-Interferometer registriert Infrarotspektren, aus denen sich die mineralische Zusammensetzung und die thermischen Eigenschaften der Oberfläche ermitteln lassen. Ein Magnetometer vermisst das schwache Magnetfeld des Planeten. Zudem kann man aus der Bahnbewegung der Sonde das Schwerefeld des Mars bestimmen, aus dem wiederum die Dicke der Kruste und die Größe der Polkappen berechnet werden kann.

Die Sonde Odyssey ergänzt Global Surveyor. Ihre Kamera macht Aufnahmen in fünf ausgewählten Farbbereichen. Ergänzt wird die Ausrüstung durch eine Infrarot-Kamera sowie durch Gammastrahlen- und Neutronendetektoren, die Wasserstoff bis zu einer Tiefe von einem Meter unter der Oberfläche nachweisen können.

NASA ARTIST CONCEPT / GLOBAL SURVEYOR PROGRAM

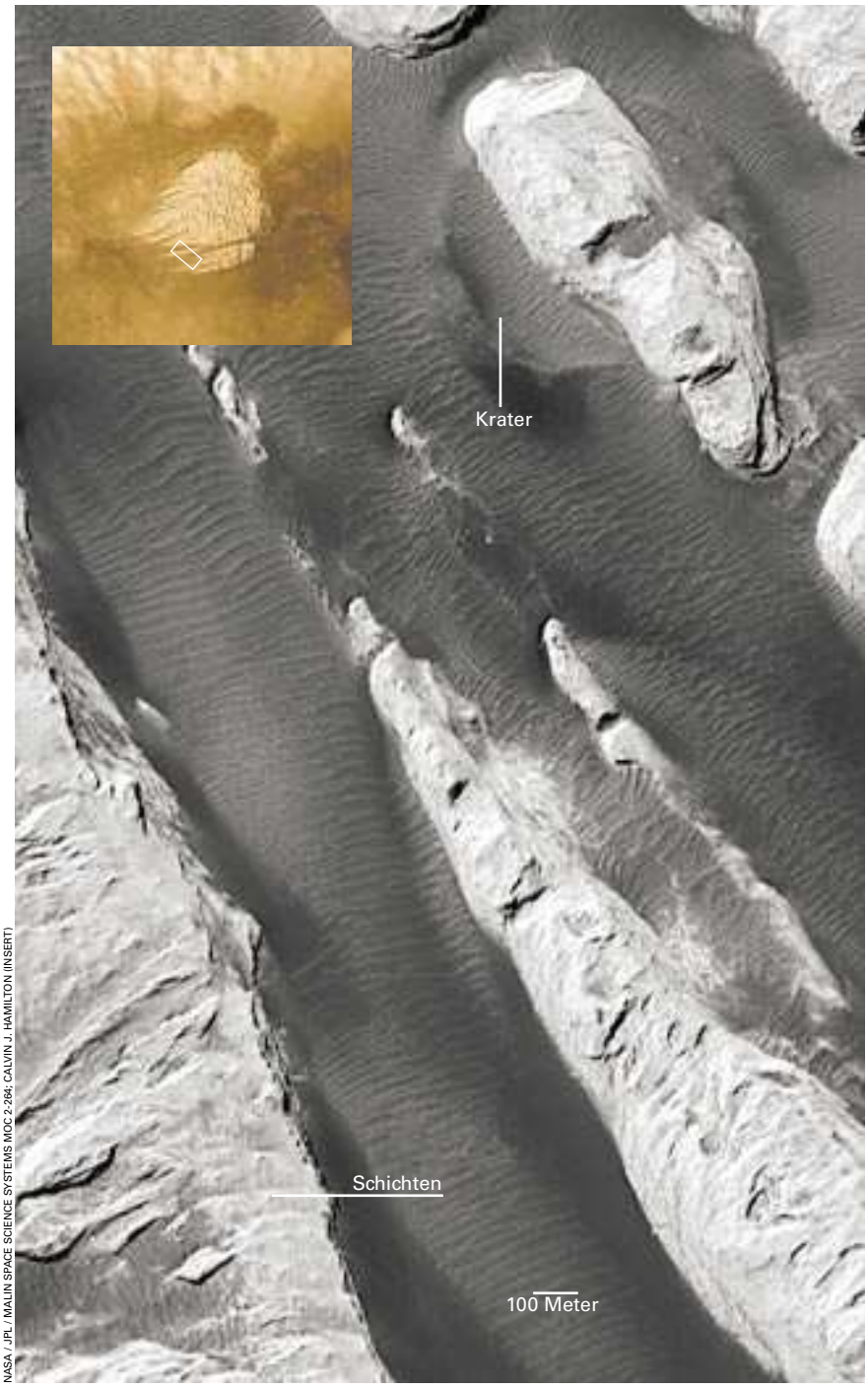
Der Mars Global Surveyor umkreist den Mars (künstlerische Ansicht).

Die beiden Sonden überwachen zudem die Atmosphäre. Kameras scannen täglich den gesamten Planeten, ähnlich den erdumkreisenden Wettersatelliten. Zwölfmal am Tag misst ein Spektrometer Temperatur, Druck, den Grad der Wolkenbedeckung und den Staubgehalt. Auch die Funkwellen zwischen Sonde und Erde werden für Messungen genutzt: Ihre Beugung in der Atmosphäre ergibt Hinweise auf die Temperatur- und Druckschichtung in dieser Gashülle.

Teuflische Spuren

In den Ebenen nordwestlich des Vulkans Olympus Mons haben Staubteufel ihre Spuren hinterlassen, die sich als dunkle Linien bemerkbar machen (rechts). Ähnliches wurde im Argyre-Becken (unten) und östlich der Valles Marineris (ganz unten) fotografiert, wobei einer der Staubteufel selbst im Bild zu sehen ist (Pfeil). Solche tornadoähnlichen Wirbel blasen den hellen Staub weg und legen den dunkleren Untergrund frei.

NASA / ARIZONA STATE UNIVERSITY THEMIS SCIENCE TEAM; 6. FEBRUAR 2003 (RECHTS); NASA / JPL / MALIN SPACE SCIENCE SYSTEMS MOC 2-220 (LINKS OBEN) UND MOC 2-318 (LINKS UNTEN)



NASA / JPL / MALIN SPACE SCIENCE SYSTEMS MOC 2-264; CALVIN J. HAMILTON (INSERT)

Der »White Rock«, fotografiert von einer Viking-Raumsonde in den 1970er Jahren (kleines Bild), ist eines der Beispiele dafür, wie Analogieschlüsse mit irdischen Formationen in die Irre führen können. Die helle Struktur ähnelt einer Salzablagerung als Überbleibsel eines ausgetrockneten Sees. Aber spektrale Untersuchungen zeigen nun, dass es sich um Sand handelt, der irgendwie verdichtet und zusammengebacken wurde. Der rötliche Sand überlagert ältere Strukturen, wie den Krater oben rechts im Bild, und wird seinerseits teilweise von dunklem Staub verdeckt. Dieses von Mars Global Surveyor aufgenommene Bild weist auf eine komplexe Abfolge geologischer Prozesse hin.

▷ sein können. Sie sind erheblich größer als vergleichbare Strukturen auf der Erde. Das berühmte Grabensystem Valles Marineris würde sich mit seinen fast 5000 Kilometern Länge von Lissabon bis zum Ural erstrecken. Stellenweise ist es 8000 Meter tief. Der Grand Canyon in den USA würde unzählige Male dort hineinpassen. An einem Ende des Grabensystems befindet sich ein chaotisch wirkendes Terrain, das darauf hinweist, dass Wasser nicht als kontinuierliches Rinnsal floss, sondern in konzentrierten, katastrophalen Schüben, die das Oberflächenmaterial entlang ihrem Weg wegschwemmten. Andere Ausflussrinnen auf dem Mars haben ähnliche Merkmale. Da diese sich in das Tharsis-Plateau eingeschnitten haben, müssen sie ein mittleres Alter haben.

Ein verästeltes Gewässersystem

Stromlinienförmige Inseln und andere Strukturen in diesen Rinnen gleichen einer Landschaft im Nordwesten der USA, die vor rund 10 000 Jahren, am Ende der letzten Eiszeit, durch die so genannte Spokane-Flut erzeugt wurde. Ein See so groß wie einer der heutigen Großen Seen durchbrach damals seinen natürlichen Damm und entleerte sich innerhalb weniger Tage in einem gewaltigen Schwall. Auf dem Mars entfalteten solche Katastrophen die zehn- bis hundertfache Zerstörungskraft. Sie könnten durch vulkanische Wärmequellen oder durch den allgemeinen Wärmestrom aus dem Planeteninneren heraus ausgelöst worden sein. Diese Wärme hätte das Eis unterhalb der dicken Permafrostschicht geschmolzen, bis der sich aufbauende Druck das Wasser aus der Frostschicht ausbrechen ließ.

Die umstrittensten Strukturen, die mit Wasser in Verbindung gebracht werden, sind die zusammenhängenden Täler im südlichen Hochland. Ihre verzweigte und verästelte Struktur erinnert an irdische Flüsse – was vermuten lässt, dass sie durch Oberflächenwasser geformt wurden, das aus Niederschlägen stammte. Sie sind das stärkste Indiz dafür, dass das Klima auf dem Mars einst so warm war wie auf der Erde. Aber diese flussbettähnlichen Netzwerke ähneln weniger den aus Niederschlägen gespeisten Flüsse auf der Erde als den Flussnetzwerken in irdischen Wüstengebieten, deren Wasserzufuhr langsam aus unterirdischen Quellen erfolgt. Solche Gewässer entspringen üblicherweise in steilwandigen Abhängen und bilden sich nicht aus einem verzweigten System aus Nebenflüssen. Auf wissenschaftlichen Kongressen wird heftig die Frage diskutiert: Regnete es einst auf dem Mars?

Einer Antwort käme man vielleicht näher, wenn sich herausfinden ließe, wann die Wasser-Netzwerke entstanden sind. Neuere Untersuchungen der nördlichen Randzone des Hochlandes zeigen, dass riesige Materialmengen während – und nicht nach – dem heftigen Meteoritenbombardement erodierten, das der Mars in der Frühzeit seiner Geschichte über sich ergehen lassen musste. Demnach wäre das Wasser mehrmals umverteilt worden als Folge der Meteoriteneinschläge, die das Landschaftsbild umgestalteten. Krater füllten sich mit Wasser und Schutt, und Kanäle begannen sie zu einem Netzwerk zu verbinden. Doch neue Einschläge unterbanden diesen Prozess immer wieder. Das Argyre-Becken beispielsweise, tausend Kilometer im Durchmesser, könnte einst randvoll mit Wasser gewesen sein. Es ist Teil eines Tälersystems, das Wasser aus der Nähe des Südpols durch das Becken hindurch in Kanäle verfrachtete, die den Äquator überquerten. Noch ist unklar, welche Rolle flüssigem oder gefrorenem Wasser in diesen Systemen zukam. Jedenfalls unterscheiden sich diese Netzwerke erheblich von dem Gewässersystem der Erde.

Ein weiterer Schlüsselbaustein zur Rekonstruktion der Marsgeschichte stammt aus einer der größten Überraschungen, die Mars Global Surveyor geliefert hat: die Vielzahl an Schichtstrukturen der obersten Kruste. Fast überall, wo der Untergrund freiliegt – an den Wänden von Canyons, Kratern, Tafelländern und Tälern –, zeigen sich Schichtstrukturen. Die einzelnen Schichten unterscheiden sich in ihrer Dicke, Farbe und Festigkeit. Sie belegen, dass die Marsoberfläche einer komplexen Abfolge an Sedimentation, Kraterbildung und Erosion unterworfen war. Die ältesten Schichten sind die am weitesten ausgedehnten. Die höheren wurden teilweise abgetragen, offenbar durch Einwirkung des Windes.

Wie haben sich die Schichten gebildet? Das Fehlen rundlicher Gesteinsblöcke spricht gegen einen vulkanischen Ursprung, wenngleich es sich um vulkanische Asche handeln könnte. Letztlich könnten die meisten Schichten auf Impaktmaterial zurückzuführen sein. Auf dem Erdmond gibt es sich überlappende Ringe von Einschlagsmaterial, die Krater unterschiedlichen Alters markieren. Auf ähnliche Weise wurde die Oberfläche des Mars durch den heftigen Meteoritenbeschuss komplett umgepflügt. Anschließend haben Wasser und Wind dieses Material weiter erodiert.

In einem gewissen Sinn sind die Vorstellungen über die Frühgeschichte des Mars heute verschwommener denn je zuvor. Dies wird deutlich, wenn die Wissenschaftler die Frage nach flüssigem Wasser angehen. Ob es flüssiges Wasser gibt oder nicht, ist von grundlegender Bedeutung für die geologischen Prozesse, Veränderungen des Klimas und die Entstehung von Leben. Die frühen Täler-Netzwerke und die späteren Flutrinnen weisen auf große Mengen von Wasser hin. Die Hinweise auf Niederschläge lassen vermuten, dass die Atmosphäre einst viel dichter war. Aber Raumsonden haben bislang keine Indizien für carbonathaltige Mineralien gefunden, die sich durch Einwirkung einer dichten Kohlendioxid-Atmosphäre gebildet haben müssten.

Die Frühzeit des Planeten liegt noch immer im Dunkeln

Derzeit diskutieren die Wissenschaftler drei Hypothesen. Der ersten zufolge war die Marsatmosphäre tatsächlich viel dichter als heute, und der Planet könnte eisfreie Seen und vielleicht sogar Meere gehabt haben. Dann müsste das Kohlendioxid entweder in den Weltraum entwichen oder in Carbonaten gebunden sein, die bislang der Entdeckung entgangen sind. Anhand der von der Sonde Mars Odyssey aufgenommenen Spektren konnten jedenfalls nur geringe Mengen von Carbonaten im Staub nachgewiesen werden.

Falls der Mars eine recht dünne Atmosphäre hatte, müsste er eine frostige Welt gewesen sein. Jedes stehende Gewässer wäre mit Eis bedeckt gewesen. Schneefälle könnten das Grundwasser aufgefüllt und zeitweise für Fließgewässer auf der Oberfläche gesorgt haben. Mehrere Wissenschaftler haben darauf aufmerksam gemacht, dass Schmelzwasser unter einem Gletscher oder einer dicken Permafrostschicht ebenfalls das Grundwasserreservoir aufgefrischt haben könnte. Wenngleich es auf dem Mars bitterkalt war, könnten kurzzeitige Erwärmungen den Wasserhaushalt des Planeten wieder reaktiviert haben. Veränderungen der Marsumlaufbahn – ähnlich denen, die den Wechsel zwischen Kalt- und Warmzeiten auf der Erde beeinflussen – trieben diesen Klimawandel an.

Der dritten Hypothese zufolge könnten die Klimazyklen nicht ausgereicht haben, den Mars so weit zu erwärmen, dass sich Wasser im flüssigen Zustand halten konnte. Relativ milde Temperaturen hätte es nur für kurze Zeitspannen nach größeren Meteoriteneinschlägen gegeben. Jeder Impakt hätte wasserreiches Material zugeführt und genügend Wärme und Wasser in die Atmosphäre transportiert, um Niederschläge zu ermöglichen. Doch schon bald darauf wäre der Planet wieder in seinen frostigen Zustand zurückgekehrt. Intensiver Vulkanismus in der Tharsis-Region könnte den frühen Mars wiederholt zu einem angenehm temperierten Ort gemacht haben.

Vielleicht ist aber auch keine dieser Vorstellungen korrekt. Wir wissen einfach noch zu wenig über die Verhältnisse auf dem frühen Mars, um seine Klimageschichte verstehen zu können. Wir werden auf die Ergebnisse weiterer Marsmissionen warten müssen. Im Gegensatz zur Erde hat der Mars einen Großteil seiner ursprünglichen Landschaft bewahrt, aus der sich wichtige Hinweise über ihre Entstehungsbedingungen herauslesen ließen. Wenn die Wissenschaftler verstehen lernen, warum sich Mars so stark von der Erde unterscheidet, würden sie auch ihr Wissen über die Geschichte unseres Heimatplaneten erweitern. Die neuen Marsmissionen, die gerade begonnen haben, werden neue Puzzlestücke für unser noch unfertiges Bild vom Mars liefern. ◁

Arden L. Albee ist wissenschaftlicher Leiter der Mars-Global-Surveyor-Mission. Bis zu seiner Emeritierung hatte er eine Professur für Geologie und Planetologie am California Institute of Technology in Pasadena inne. Von 1978 bis 1984 war er Chefwissenschaftler am Jet Propulsion Institute der Nasa in Pasadena.

Die Mars-Mission. Von H. Heuseler, R. Jaumann und G. Neukum. BLV, München 1998.

The Mars Global Surveyor Mars Orbiter Camera: Interplanetary Cruise through Primary Mission. Von Michael C. Malin und Kenneth S. Edgett in: Journal of Geophysical Research, Bd. 106, Heft E10, S. 23429 (25. Oktober 2001)

Mars. Sonderteil in: Nature, Bd. 412, S. 207 (12. Juli 2001)

Mars 2000. Von Arden L. Albee in: Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Bd. 28, S. 281 (2000).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Der Charme des

Tief ins Glas geschaut: Die rasch aufsteigenden Gasbläschen im Champagner sind nicht nur schön anzusehen, sie sind auch verbunden mit komplexen physikalischen und chemischen Prozessen, die eine wichtige Rolle bei der Entfaltung von Geschmacks- und Duftstoffen spielen.

Champagners

Einem Sektglas, gefüllt mit prickelndem Schaumwein, gehen auch nüchterne Wissenschaftler gerne auf den Grund.

Von Gérard Liger-Belair

Öffnen Sie eine Flasche französischen Champagner und schenken Sie sich ein Glas ein. Nippen Sie. Genießen Sie das Prickeln der goldenen Tröpfchen, die zu Tausenden der angenehm bitzelnden Oberfläche entspringen. Die im moussierenden Getränk aufsteigenden und dann zerplatzenden Bläschen überbringen Ihrer Nase eine verlockende Blume und Ihrer Zunge ein köstliches Aroma. Jeder Schluck ist begleitet von einer Symphonie zarter Knistergeräusche. Er lässt Sie die erfrischende Kühle der Kohlensäure und gleichzeitig die angenehme Wärme des Alkohols spüren.

Der Zauber des edlen Schaumweins aus der französischen Provinz Champagne ist so groß, dass sein Genuss weltweit zu einem festen Bestandteil, ja fast zu einem Ritual feierlicher Veranstaltungen geworden ist.

Zu den Kennzeichen eines guten Champagners zählen die zahlreichen »Perlenschnüre« aus Bläschen, die von den Wänden eines gefüllten Glases nach oben steigen. Sobald die Bläschen die Oberfläche erreichen, ordnen sie sich dort zu einem Ring an. Häufig wird die Qualität eines Champagners damit in Verbindung gebracht, wie fein diese Bläschen sind; wissenschaftlich erwiesen ist ein solcher Zusammenhang allerdings nicht.

Das Geschäft mit dem traditionellen moussierenden Charakter von Champagner ist jedoch so lukrativ geworden, dass die Champagner-Händler größten Wert auf die perfekte kleine »Perle« legen. Deshalb beschlossen vor einigen Jahren Forschungskollegen der Universität Reims Champagne-Ardenne und der Champagner-Kellerei Moët & Chandon, mit mir gemeinsam das Verhalten von Bläschen in kohlensäurehaltigen Getränken zu untersuchen. Wir setzten uns das Ziel, die Rolle der vielen Parameter, welche die Blasenbildung beeinflussen, zu bestimmen, zu veranschaulichen und schließlich besser zu verstehen. Die eigentlich einfache Beobachtung eines mit Schaumwein, Bier oder Sprudel gefüllten Glases aus nächster Nähe offenbarte uns bisher unerforschte und optisch ansprechende Phänomene.

Kohlendioxid unter Druck

Hauptverantwortlich für die Erzeugung von Gasblasen in Champagner, Schaumweinen oder Bier ist Kohlendioxid. Es bildet sich, wenn Zucker mit Hefe vergärt und dabei in Alkohol und Kohlendioxid umgewandelt wird. Sodagetränken wird die Kohlensäure industriell zugefügt. Nach der Abfüllung in Flaschen oder Dosen stellt sich – gemäß dem Henry'schen Gesetz – ein Gleichgewicht ein zwischen dem in der Flüssigkeit gelösten Kohlendioxid und dem gasför- ▷

migen, das sich direkt unter dem Korken, Deckel oder Schraubverschluss ansammelt. Der englische Physiker und Chemiker William Henry hatte Anfang des 19. Jahrhunderts erkannt, dass die Menge des in einer Flüssigkeit gelösten Gases proportional zum Druck des darüber befindlichen Gases ist.

Wenn der Behälter geöffnet wird, fällt der Druck des gasförmigen Kohlendioxids oberhalb der Flüssigkeit abrupt ab, und das vorherrschende thermodynamische Gleichgewicht wird zerstört. Als Folge davon ist die Flüssigkeit mit Kohlendioxid übersättigt. Ein dem Atmosphärendruck entsprechendes Gleichgewicht stellt sich erst wieder ein, wenn genügend Kohlendioxid die übersättigte Flüssigkeit verlassen hat. Dies kann nach Einschenken des Getränks auf zwei Wegen geschehen: Entweder entweichen die gelösten Kohlendioxidmoleküle durch die Oberfläche der Flüssigkeit in die Luft oder sie bilden kleine Bläschen.

Auf Verunreinigungen kommt es an

Um sich zu einem Vorstadium einer Blase – einer Art Keimzelle – zusammenzufinden, müssen sich die Kohlendioxidmoleküle zunächst einmal ihren Weg durch die Flüssigkeitsmoleküle bahnen, die durch die starken, auf Dipol-Anziehung beruhenden van-der-Waals-Kräfte eng miteinander verbunden sind. Damit sich eine Blase bildet, muss also zunächst eine Energiebarriere überwunden werden. Diese erfordert allerdings höhere Übersättigungswerte als in kohlensäurehaltigen Getränken üblich.

In schwach übersättigten Flüssigkeiten – Champagner, Schaumweine, Biere und Sodagetränke eingeschlossen – setzt die Blasenbildung voraus, dass bereits mit Gas gefüllte Hohlräume vorhanden sind. Deren Krümmungsradius darf eine kritische Größe aber nicht unterschreiten. Denn innerhalb der Gastasche entsteht aufgrund der konkaven Krümmung der Blasengrenzfläche ein Überdruck, der nach dem Laplace'schen Gesetz umgekehrt proportional zu ihrem Radius ist. (Der französische Naturwissenschaftler Pierre Simon Laplace hatte diese Formel für einen Flüssigkeitstropfen aufgestellt, in dem wegen der Oberflächenspannung ein Überdruck gegenüber dem Luftdruck entsteht.) Je kleiner die Blase, desto größer ist also der in ihr herrschende Überdruck. Unterhalb eines kritischen Radius ist der Druck so stark, dass er das Eindringen von gelöstem Kohlendioxid verhindert. In einer frisch geöffneten Champagnerflasche liegt dieser kritische Radius bei etwa 0,2 Mikrometer.

Um im Detail zu beobachten, wie sich die Ketten aus Champagner-Perlen bilden, richteten wir eine mit einem Mikroskop-Objektiv ausgestattete Hochgeschwindigkeitsvideokamera auf die Ausgangsstellen von mehreren hundert »Perlenschnüren«. Entgegen gängigen Vorstellungen befanden sich diese »Keimstätten« nicht auf Unebenheiten der Glasoberfläche. Diese sind viel kleiner als der für die Blasenbildung erforderliche kritische Radius. Als Auslöser der Bläschen stellten sich vielmehr Verunreinigungen heraus, die an der Glaswand haften. Dabei handelt es sich zumeist um hohle, mehr oder weniger zylindrische Zellulose-Fasern, die aus der Luft stammen oder beim Abtrocknen hängen blieben. Aufgrund ihrer geometrischen und Wasser abstoßenden Eigenschaften werden diese Fremdkörper beim Füllen des Glases nicht vollständig durch das Getränk benetzt und sind deshalb in der Lage, Gastaschen gefangen zu halten.

In diese winzigen Gastaschen wandern Kohlendioxidmoleküle, die in der Flüssigkeit gelöst waren, und setzen so die Blasenbildung in Gang. Schließlich wächst eine Blase von makroskopischer Größe heran, die anfangs durch Kapillarkräfte mit ihrer Entstehungsstätte verwurzelt bleibt. Infolge des zunehmenden Auftriebs löst sich die Blase schließlich von der Glaswand und macht damit den Weg für die Bildung einer neuen Blase frei. Dieser Vorgang wiederholt sich, bis das gelöste Kohlendioxid zur Neige geht und die Bläschen-Produktion nachlässt.

Die Frequenz der zyklischen Blasenbildung, das heißt, die pro Sekunde erzeugte Anzahl von Bläschen, hat einen für den jeweiligen Entstehungsort charakteristischen Wert. Sie lässt sich mithilfe eines Stroboskops sichtbar machen. Wenn das Flackern des Stroboskops die gleiche Frequenz wie die Bläschen-Produktion hat, scheinen die Bläschen-Ketten »eingefroren« zu sein.

Da die Kinetik des Blasenwachstums auch vom Gehalt an gelöstem Kohlendioxid abhängt, unterscheidet sich die Frequenz der Blasenbildung von einem kohlensäurehaltigen Getränk zum andern. Champagner zum Beispiel hat einen dreimal so hohen Gehalt an Kohlensäure wie Bier. Hier entsenden die besonders aktiven Keimstätten bis zu dreißig Bläschen in der Sekunde. In Bier hingegen sind es nur etwa zehn Blasen in der Sekunde.

Sobald sich die Champagner-Perle von ihrem Entstehungsort freigemacht hat, nimmt sie auf ihrem Weg zur Oberfläche stetig an Größe zu (siehe Bildsequenz im Kasten rechts). Grund dafür ist die kontinuierliche Diffusion von gelöstem Kohlendioxid durch die Gas/Flüssigkeits-Grenzfläche ins Innere der Blase. Infolge der Ausdehnung wächst der Auftrieb, die Bläschen werden ständig weiter beschleunigt und ihr gegenseitiger Abstand vergrößert sich.

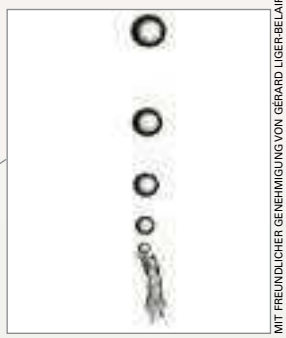
Der Aufstieg der Blasen – molekular betrachtet

Biere und Schaumweine sind keine reinen Flüssigkeiten. Außer Alkohol und gelöstem Kohlendioxid enthalten sie viele weitere organische Verbindungen, die eine Oberflächenaktivität wie Seifenmoleküle aufweisen können. Solche oberflächenaktiven Moleküle, hauptsächlich Proteine und Glykoproteine, verfügen über einen wasserlöslichen und einen wasserunlöslichen Teil. Statt sich in der gesamten Flüssigkeit gleichmäßig zu verteilen, sammeln sie sich lieber um eine Blasenoberfläche herum an, wobei ihre hydrophoben Enden zu dem Gasbläschen weisen, während die hydrophilen in der Flüssigkeit stecken.

Die oberflächenaktive Schicht auf der Blase hat in der Tat einen entscheidenden Einfluss auf ihr weiteres Verhalten. Der zunehmende Auftrieb bewirkt zunächst, dass sich eine Gastasche von ihrem Entstehungsort löst und gezwungenermaßen ihren Weg durch die hinderlichen Flüssigkeitsmoleküle bahnt. Die oberflächenaktiven Moleküle, die sich an die Blase heften, versteifen deren Oberfläche, sie bilden gewissermaßen einen Schild um sie herum.

Aus der Dynamik von Flüssigkeiten wissen wir, dass eine starre Kugel in einer Flüssigkeit einen größeren Widerstand erfährt als eine flexiblere, deren Oberfläche frei von Verunreinigungen ist. Auf der emporsteigenden Blase sammeln sich nach und nach immer mehr oberflächenaktive Moleküle an, sodass sich ihr unbeweglicher Bereich vergrößert. Deshalb würde bei konstant bleibendem Radius die Blase immer stärker den Zugkräften der Flüssigkeit ausgesetzt sein, die dem Auftrieb entgegenwirken. Die Aufstiegsgeschwindigkeit erreichte dann ein Mini-

Prickelnde Perlenspiele erhöhen den Genuss



MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON GÉRARD LIGER-BELAIR

Das kurze Dasein eines Champagnerbläschens beginnt auf einem winzigen Staubkorn aus Zellulose, das beim Abtrocknen an der Glaswand hängen blieb (Foto unten). An diesem Moussier-Punkt bildet sich, wenn der Schaumwein eingeschenkt wird, eine Art »Gastasche« mit einem Durchmesser von weniger als einem Mikrometer. In der Flüssigkeit gelöstes Kohlendioxid dringt in diesen Hohlraum ein und dehnt ihn schließlich so stark aus, dass sich die Gaskapsel aufgrund des Auftriebs von ihrer Entstehungsstätte löst. Während ihrer Reise zur Oberfläche der Flüssigkeit nimmt der Umfang der Blase immer weiter zu, da mehr und mehr Kohlendioxid in sie eindringt (Foto Mitte). Gleichzeitig heften sich aromatische Duftmoleküle aus der Flüssigkeit an die Gas/Flüssigkeits-Membran. Die auf die Blase wirkenden Zugkräfte werden dadurch verstärkt und ihr Aufstieg verlangsamt sich. Bald nach ihrem Auftauchen aus der Oberfläche fällt die Bukettstoffe tragende Gaskapsel in sich zusammen, wobei ein wenig des umgebenden Weins in die Luft gespritzt wird (Foto oben). Dies bringt das Bukett und den charakteristischen Geschmack des Champagners zur vollen Geltung.

Nach Ansicht von Weinexperten sollte Champagner am besten in langstieligen, tulpenförmigen Sektgläsern gereicht werden, die etwa ein zehntel Liter fassen (siehe Foto links). Ihre hohe und schmale Form bietet dem Perlenspiel genügend Raum, sich zu voller Schönheit zu entfalten. Durch die kleine Oberfläche und die leichte Wölbung des Glasrandes nach innen konzentrieren sich die Bukettstoffe, die von den Bläschen hochtransportiert und bei ihrem Platzen freigesetzt werden. In den schmalen Kelchen bleibt das Getränk außerdem länger kühl und prickelnd.

Etwas weniger für den Genuss von Schaumweinen geeignet sind Sektflöten, deren konusförmiges Glas sich nach oben weitet. Völlig ungeeignet sind hingegen die breiten Sektschalen (die »Coupes«), die eine Zeit lang so populär waren. Einem Mythos zufolge wurden diese rundlichen Gläser nach den für ihre Schönheit berühmten Brüsten der französischen Königin Marie-Antoinette kreiert. Doch weder Form noch Funktion werden den speziellen Eigenschaften von Champagner gerecht: Wegen der großen Oberfläche werden der Nase wertvolle Bukettstoffe entzogen, was das sensorische Erlebnis beeinträchtigt. Zudem schwappt der Sekt in ihnen leicht über, und bereits das Halten des Glases in der Hand erwärmt ihn – ganz abgesehen davon, dass das Perlenspiel in den flachen Gläsern kaum zur Geltung kommt.

Zum Öffnen der Champagnerflasche hält man sie schräg – unter einem Winkel von etwa 45 Grad. Der Korken weist aufwärts und natürlich von einem selbst und den Köpfen der Gäste weg. Halten Sie mit einer Hand den Korken fest und drehen Sie mit der anderen die Flasche. Ein lauter Knall ist übrigens nicht nur verpönt; mit ihm werden auch die kostbaren Champagnerbläschen vergeudet: Was im Ohr gewonnen wird, geht dem Gaumen letztlich verloren. Von Stil und Fachkunde zeugt es, wenn der Korken mit einem leisen Seufzer aus dem Flaschenhals gleitet.

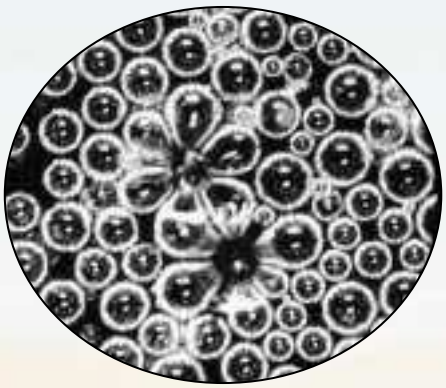
DIESES BILD UND SEITE DAVOR: EISENHUT & MAYER, GETTY IMAGES

Das Ende einer Blase

Der Zerfall des Champagnerbläschens beginnt, kaum dass es die Oberfläche des edlen Getränks erreicht hat (Fotosequenz rechts). Das zweite Foto zeigt den Moment, an dem der dünne Flüssigkeitsfilm, aus dem der auftauchende Teil der Blase besteht, gerade eingefallen ist. Während dieses extrem kurzen Vorgangs bleibt die Grundform der beinahe einen Millimeter breiten Blase unversehrt. Wenn der so entstandene Hohlraum einbricht, spritzt ein Sektstrahl aus der Oberfläche heraus (drittes Foto). Seine hohe Geschwindigkeit lässt ihn sogleich instabil werden und in kleine Tröpfchen zerfallen.

Da nach Einschenken des Champagners in jeder Sekunde Hunderte von Bläschen zerbersten, hat das Getränk buchstäblich eine »stachelige« Oberfläche, voll von kegelförmigen Strukturen, die aber leider zu flüchtig sind, um mit dem bloßen Auge wahrgenommen zu werden.

Champagnerbläschen bilden an der Oberfläche des Getränks blütenartige Strukturen, wenn in ihrer Mitte eine der Blasen zerplatzt ist. Der entstehende Sog zieht dann benachbarte Bläschen an. Da der Vorgang extrem schnell abläuft (in weniger als hundert Mikrosekunden), gibt es nur wenige Fotografien, auf denen er festgehalten ist (ovale Bilder unten).



MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON GÉRARD LIGER-BELAIR

TOSHIO NAKAJIMA, PHOTONICA

▷ mum, wenn die Gas/Flüssigkeits-Grenzfläche vollständig mit oberflächenaktiven Molekülen belegt ist. Genau genommen verhält sich die Blasengrenzfläche schon starr, bevor sie zur Gänze mit einer Verunreinigungsschicht überzogen ist.

Da sich reale Blasen beim Aufstieg durch die übersättigte Flüssigkeit ausdehnen, ist der Vorgang in Wahrheit komplexer als hier für Blasen mit konstantem Radius beschrieben. Durch die Expansion nimmt die Grenzfläche zu, wodurch immer mehr oberflächenaktive Moleküle andocken können. Anschwellende Blasen unterliegen deshalb gegensätzlichen Wirkungen. Falls ihre Ausdehnungsrate größer ist als die Geschwindigkeit, mit der die oberflächenaktiven Moleküle die Kugel versteifen, »säubert« die Blase ihre Grenzfläche fortwährend, weil das Verhältnis von bedeckter Oberfläche zu unbedeckter abnimmt. Falls aber dieses Verhältnis zunimmt, wird die Blasenoberfläche unaufhaltsam rundum mit einer einzelnen Lage von oberflächenaktiven Molekülen verunreinigt und erstarrt.

Bierblasen verhalten sich anders

Wir bestimmten die Koeffizienten der Zugkräfte, die auf die expandierenden Champagner- und Bierbläschen bei ihrem Aufstieg wirken, und verglichen unsere Messergebnisse mit den Daten der wissenschaftlichen Literatur über Blasen-Dynamik. So erhielten wir Einblicke in die für das jeweilige Getränk spezifischen Eigenschaften der Bläschen. Während sich Bierbläschen ähnlich wie starre Kugeln verhalten, zeigen die Perlen in Champagner, Schaumweinen und Sodageträänken auf ihrem Weg nach oben eine beweglichere Grenzfläche. Das ist nicht allzu überraschend, da Bier weit mehr oberflächenaktive Makromoleküle enthält (ungefähr mehrere hundert Milligramm pro Liter) als Champagner (nur wenige Milligramm pro Liter). Da Bier außerdem weit weniger Kohlensäure enthält als Champagner, dehnen sich Bierbläschen langsamer aus als Champagner-Perlen. Der auf die Expansion der Bierblase zurückgehende Säuberungseffekt ist infolgedessen zu schwach, um die Erstarrung ihrer Gas/Flüssigkeits-Grenzfläche zu verhindern. In Champagner, Schaumweinen und Sodageträänken dagegen lässt es das schnelle Wachstum der Blasen nicht zu, dass die in relativ geringer Menge vorkommenden oberflächenaktiven Moleküle deren Oberfläche versteifen.

In den wenigen Sekunden nach ihrer Entstehung und Freisetzung wandert die Champagner-Perle hoch zur Oberfläche des Getränks, wobei sie schließlich einen Durchmesser von etwa einem Millimeter erreicht. Von der Blase ragt nur ein Stückchen aus der Flüssigkeit heraus, während sich der größte Teil ihres Volumens unterhalb der Oberfläche befindet. Der auftauchende Teil, die »Blasen-Haube«, ist ein Flüssigkeitsfilm von der Form einer Halbkugel, der – weil seitlich beständig Flüssigkeit abfließt – mit der Zeit immer dünner wird. Sobald die Blasen-Haube eine bestimmte kritische Dicke unterschreitet, wird sie empfindlich für Schwingungen und Temperaturgefälle, wodurch sie schließlich zerplatzt.

Der Zerfall setzt Aroma- und Duftstoffe frei

Unabhängig voneinander haben 1959 zwei Physiker, Geoffrey Ingram Taylor von der Universität Cambridge und Fred E. C. Culick vom California Institute of Technology in Pasadena gezeigt, dass aufgrund von Oberflächenspannungen ein Loch in der Blasen-Haube entsteht und dass sich dieses Loch sehr schnell vergrößert. Bei Bläschen von etwa einem Millimeter Durchmesser dauert dieser Zerfall etwa zehn bis hundert Mikrosekunden (siehe Bildsequenz im Kasten links).

Auf das Aufreißen der Blasen-Haube folgt ein komplexer hydrodynamischer Prozess, der schließlich auch den untergetauchten Teil der Blase zerstört. Einen Moment lang verbleibt ein offener Hohlraum in der Flüssigkeitsoberfläche, dann stürzen seine Wände nach innen ein. Wenn sie aufeinander treffen, schießt ein Flüssigkeitsstrahl aus der freien Oberfläche hinaus. Aufgrund seiner hohen Geschwindigkeit wird der Strahl instabil und zerfällt in einzelne Tröpfchen.

Das Zusammenspiel von Trägheit und Oberflächenspannung verleiht den sich ablösenden Strahltropfen eine Vielzahl unterschiedlicher und oft überraschender Formen. Am Ende nehmen sie fast die Gestalt einer Kugel an. Da in jeder Sekunde Hunderte von Blasen zerbersten, hat das Getränk sozusagen eine stachelige Oberfläche: Sie ist gespickt mit konischen Strukturen, die aber zu kurzlebig sind, um mit dem bloßen Auge wahrgenommen zu werden.

Die an der Oberfläche zerplatzenden Bläschen bieten nicht nur einen schönen Anblick, sondern sie vermitteln auch das eigentümliche prickelnde Gefühl, das Champagner, Schaumweine, Biere und viele andere Getränke hervorrufen. Mit einer Geschwindigkeit von mehreren Metern pro Sekunde spritzen Tröpfchen einige Zentimeter weit über die Oberfläche hinaus und erreichen so bereits vor dem Trinken die menschlichen Sinnesorgane. Beim Kosten werden sowohl die Schmerzrezeptoren in der Nase erregt als auch die für Berührung empfindlichen Rezeptoren im Mund, wenn Bläschen auf der Zunge zergehen. Dort hinterlassen sie eine leicht saure wässrige Lösung.

Die an der Oberfläche zerfallenden Bläschen üben aber nicht nur einen mechanischen Reiz aus, sondern spielen höchstwahrscheinlich auch eine größere Rolle bei der Freisetzung der Aroma- und Geschmacksstoffe. Denn die molekularen Strukturen vieler aromatischer Verbindungen in kohlensäurehaltigen Getränken zeigen Oberflächenaktivität. Die in der Flüssigkeit aufsteigenden und sich ausdehnenden Bläschen nehmen also aromatische Moleküle auf und schleppen sie wie ein Fahrstuhl mit nach oben. Infolgedessen konzentrieren sich diese Verbindungen auf der Oberfläche des Getränks.

Nach unserer Vorstellung versprühen die Bläschen beim Zerplatzen Wolken aus winzigen Tröpfchen in die Luft, die hohe Konzentrationen an aromatischen Molekülen enthalten und daher die verschiedenen Duftnoten der Getränke unterstreichen. In einem weiteren Projekt wollen wir diese Wirkung der Geschmacksfreisetzung für jedes der zahlreichen aromatischen Moleküle in Champagner quantitativ bestimmen. ◁

Gérard Liger-Belair lehrt an der Universität Reims Champagne-Ardenne in Frankreich, an der er die physikalische Chemie von Bläschen in kohlensäurehaltigen Getränken erforscht. Zudem berät er die Forschungsabteilung der Champagner-Kellerei Moët & Chandon. Liger-Belair nutzt für die Untersuchung dünner Filme und Grenzflächen die Hochgeschwindigkeitsfotografie. Deren Ergebnisse sind in Kunstgalerien zu sehen.

Kinetics of Gas Discharging in a Glass of Champagne. Von Gérard Liger-Belair et al. in: Langmuir, Bd. 18, S. 1294 (2002).

Physicochemical Approach to the Effervescence in Champagne Wines. Von Gérard Liger-Belair in: Annales de Physique, Bd. 27, Nr. 4, S. 1 (2002).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Der steinige Weg zur Anti-Aging-Pille

Ein biblisches Alter erreichen und dabei vital bleiben – hochwertige Schmalkost könnte dazu verhelfen. Forscher suchen nach einer Pille, die den Effekt harter Selbstkasteiung durch Hungern imitiert.

Von Mark A. Lane, Donald K. Ingram und George S. Roth

Gegen Altern scheint bislang kein Kraut gewachsen. Kein käufliches Mittel kann bislang beim Menschen nachweislich den Prozess verzögern – so das Fazit eines Positionspapiers, das 51 Experten im Mai 2002 veröffentlichten. Als »Altern« bezeichnen sie dabei das allmähliche Anhäufen molekularer und zellulärer Schäden, die immer anfälliger und schließlich gebrechlich machen (siehe SdW 8/2002, S. 68). Eine Maßnahme jedoch bringt immerhin bei Tieren, ganz verschiedenen Arten zudem, geradezu unglaublich gute Ergebnisse: Eine stark kalorienreduzierte, aber ernährungsphysiologisch ausgewogene Kost lässt die Tiere länger leben und – noch wichtiger – länger fit bleiben. Vermutlich könnte somit eine entsprechende Diät auch das Altern beim Menschen verzögern.

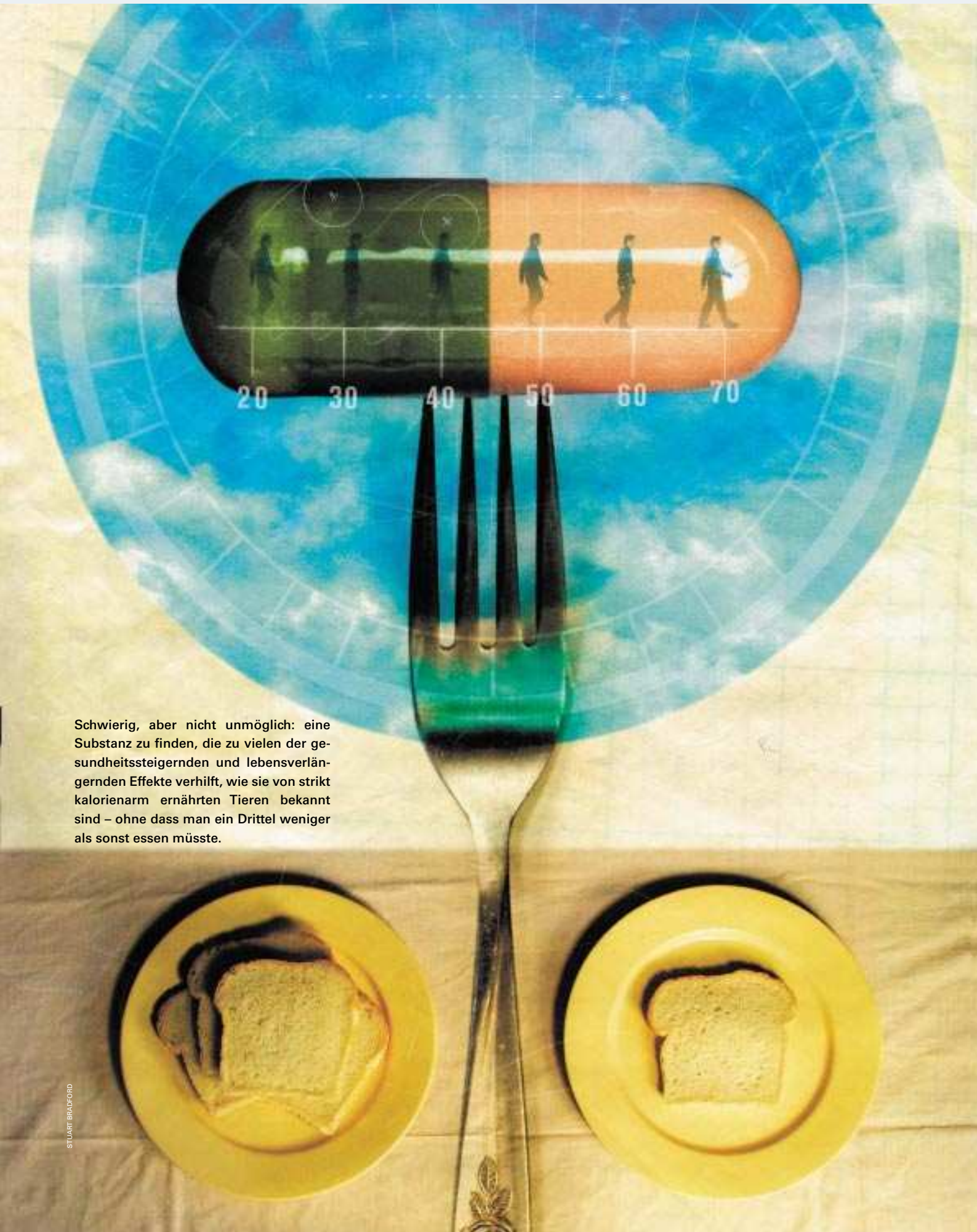
Für maximale Effekte müsste allerdings jemand seine tägliche Kalorienzufuhr wahrscheinlich um zirka ein Drittel senken. Das hieße beispielsweise, statt 2500 nur 1750 Kilokalorien aufzunehmen. Nur wenige Sterbliche könnten eine solch strenge Diät einhalten, und das auch noch jahrelang. Doch was wäre, wenn eine Pille erfunden würde, welche die physiologischen Effekte der Schmalkost imitierte, ohne zum Hungern zu zwingen? Könnte ein solches Kalorienreduktions-Mimetikum, wie wir es nennen, die Menschen in die Lage versetzen, länger gesund zu bleiben, also erst in einem sehr späten Lebensabschnitt an altersbedingten Leiden – wie Diabetes, Gefäßverkalkung, Herzproblemen und Krebs – zu erkranken?

Wir stellten uns diese Frage erstmals Mitte der 1990er Jahre, nachdem wir auf einen chemischen Stoff gestoßen waren, der bei Nagetieren offenbar viele günstige Effekte einer Kalorienreduktion nachahmte. Seitdem suchen wir und andere Forscher nach einer gesundheitlich unbedenklichen Substanz, die ohne problematische Nebenwirkungen beim Menschen dasselbe Kunststück fertig bringt. So paradox es klingt: Unsere bisherigen Misserfolge sind aufschlussreich – und haben die Hoffnung wachsen lassen, dass sich tatsächlich Kalorienreduktions-Mimetika entwickeln lassen.

Zunächst ging es uns darum, die zahlreichen Wirkungen einer Kalorienknappheit auf den Körper besser zu verstehen. Schon vor mehr als sechzig Jahren hatten Wissenschaftler den Wert der Maßnahme bei Tieren erkannt. Wie sie damals feststellten, lebten kalorienarm ernährte Ratten im Durchschnitt länger als Artgenossen, die nach Belieben fressen durften. Typische altersbedingte Leiden traten zudem seltener auf. Was aber noch mehr zählt: Einige der kurz gehaltenen Tiere wurden sogar älter als die am längsten lebenden der Vergleichsgruppe. Das bedeutete nämlich, dass die maximale Lebensdauer – das höchste erreichbare Alter – zunahm und nicht einfach nur die durchschnittliche Lebensspanne. Verschiedene Maßnahmen wie die Gabe infektionsbekämpfender Arzneimittel können die durchschnittliche Lebensdauer einer Gruppe erhöhen (indem sie vorzeitige Todesfälle verhindern), aber nur Maßnahmen, die das Altern des Körpers verlangsamen, steigern die maximale Lebensdauer.

Gesünder durch karge Kost

Die Versuche mit Ratten wurden von vielen Seiten wiederholt und auf ein breites Spektrum von Lebewesen ausgedehnt: von Hefezellen über Taufliegen, Würmer, Spinnen und Fische zu anderen Labornagern. Lange beschränkten sich die Wissenschaftler auf solche kurzlebigen Lebewesen, die dem Menschen genetisch nicht gerade nahe stehen. Mittlerweile laufen jedoch Langzeitstudien an zwei Tierarten, die mit dem Menschen näher verwandt sind: Rhesus- und Totenkopfaffen. Initiiert wurde das eine Affenprojekt in den späten 1980er Jahren von unserer Gruppe am amerikanischen Nationalen Alterungsinstitut in Bethesda (Maryland). Das andere wurde in den frühen 1990er Jahren begonnen und zwar durch ein Forschungsteam an der Universität von Wisconsin in Madison. Die bisherigen Ergebnisse legen nahe, dass Primaten auf eine ausgewogene Schmalkost fast identisch wie Nagetiere ▷

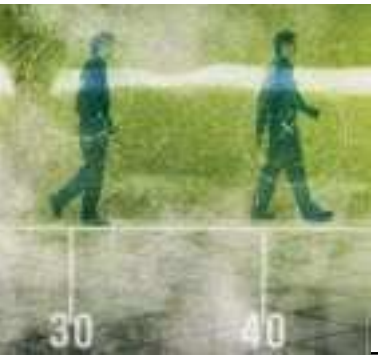


Schwierig, aber nicht unmöglich: eine Substanz zu finden, die zu vielen der gesundheitssteigernden und lebensverlängernden Effekte verhilft, wie sie von strikt kalorienarm ernährten Tieren bekannt sind – ohne dass man ein Drittel weniger als sonst essen müsste.

STUART BRADFORD

▷ reagieren – das macht uns optimistischer denn je, dass eine dies imitierende Substanz dem Menschen nützen könnte.

Beispielsweise haben Affen bei einer stark kalorienreduzierten Kost eine niedrigere Körpertemperatur und niedrigere Insulin-Spiegel. Außerdem bleibt der Blutspiegel bestimmter anderer Hormone, der gewöhnlich mit dem Alter abnimmt, länger auf jugendlichem Niveau. Dazu zählt Dehydroepiandrosteron in seiner Sulfatform, kurz DHEAS. Es ist ein Androgen aus der Nebennierenrinde



Ein Defekt in einem Gen namens »ich bin noch nicht tot« lässt Taufliegen fast doppelt so lang leben

und wirkt schwächer als das typische männliche Hormon Testosteron.

Bestimmten Indikatoren nach sinkt bei diesen Tieren zudem das Risiko für altersbedingte Krankheiten. Beispielsweise liegen ihre Blutdruck- und Blutfettwerte niedriger, was eine verminderte Wahrscheinlichkeit für Herzinfarkt und Schlaganfall signalisiert. Darüber hinaus bleibt ihr Blutzuckerspiegel eher im Normalbereich, was für ein geringeres Diabetes-Risiko spricht. Tatsächlich entwickeln unsere Rhesusaffen, die nun schon fast 15 Jahre strikt kalorienarm ernährt werden, seltener chronische Krankheiten. Sie und andere Affen müssen jedoch noch länger beobachtet werden, bevor wir wissen, ob eine solche Schmalkost sowohl ihre durchschnittliche als auch ihre maximale Lebensdauer verlängert. Rhesusaffen bringen es normalerweise im Mittel auf 24, einige sogar auf 40 Jahre. Totenkopfäffchen leben hingegen im Schnitt 19, maximal 28 Jahre.

Wie aber verzögern die vielen physiologischen und biochemischen Veränderungen, die durch Kalorienreduktion hervorgerufen werden, den Alterungsprozess bei Säugetieren? Dieser Frage begannen wir um 1995 nachzugehen. Aus mehreren Gründen vermuteten wir, dass Veränderungen im Zellstoffwechsel eine Schlüsselrolle spielen. Mit »Stoffwechsel« meinen wir die Aufnahme von Nährstoffen aus dem Blut und deren Umwandlung in Energie, die für zelluläre Prozesse nutzbar ist. Auf ihn konzentrierten wir uns zum einen deshalb, weil die positiven Effekte einer Kalorienreduktion eindeutig auf der geminderten Gesamtmenge an Brennstoff beruhen, die zum Weiterverarbeiten in den Körper gelangt. Der andere Grund: Da die kalorische Beschränkung das Altern von vielerlei Geweben beeinflusst, sollte sie biologische Prozesse verändern, die in allen Zellen ablaufen. Der Stoffwechsel wiederum ist einer der wirklich fundamentalen Prozesse.

Wir fragten uns insbesondere, ob Veränderungen beim Zucker-Stoffwechsel die Nutzeffekte erklären können. Glucose, besser bekannt als Traubenzucker, ist die primäre Energiequelle des Körpers. Die Nahrung liefert diesen Brennstoff pur oder in Form zusammengesetzter Kohlenhydrate. Das »Verbrennen« von Glucose ist für Zellen die wichtigste Möglichkeit, Adenosintriphosphat zu erzeugen. Erst dieses Molekül, kurz ATP genannt, treibt die meisten Zellprozesse dann direkt an.

Außerdem wollten wir wissen, wie wichtig Veränderungen im Zusammenhang mit Insulin sind. Dieses Hormon wird von der Bauchspeicheldrüse ausgeschüttet, sobald der Glucose-Spiegel im Blut nach einer Mahlzeit ansteigt; es dient quasi als Schlüssel, der dem Zucker die Türen in die Zellen öffnet. Wir konzentrierten uns auf Glucose und Insulin, weil eine kalorienarme Ernährung sehr bald schon den jeweiligen Blutspiegel absenkt und die Zellen auf das Hormon besser ansprechen lässt. Beides zählt zu den zuverlässigsten Merkmalen einer Kalorienreduktion bei Nagetieren wie bei Primaten.

Zucker als Falschmünze

Kurz nachdem wir uns für solche Untersuchungen entschieden hatten, veröffentlichten andere Wissenschaftler erste Ergebnisse, die besagen, dass Stoffwechselprozesse, an denen Glucose und Insulin beteiligt sind, die Lebensdauer beeinflussen. Das bestärkte uns in der Überzeugung, auf der richtigen Fährte zu sein. So verlängerte sich etwa die Lebensdauer von Fadenwürmern beachtlich, wenn ähnliche Gene und damit Proteine mutiert waren, wie sie an molekularen Reaktionen auf Insulin bei Säugetieren beteiligt sind. Etwas später stellten Wissenschaftler bei Hefezellen fest, dass eine verminderte Aufnahme von Glucose oder eine beeinträchtigte Verarbeitung ebenfalls lebensverlängernd wirken kann. Bei Taufliegen schließlich zeigte sich, dass auch hier manche »Stoffwechsel-Gene« die Lebensdauer beeinflussen. Eine solches Gen erhielt den witzigen Namen INDY – I'am not dead yet, »ich bin noch nicht tot«. Fällt es aus, leben die Tiere fast doppelt so lang.

Etwa um die Zeit, als die Fadenwurm-Studie herauskam, begannen wir die wissenschaftliche Literatur nach Methoden zu durchforsten, mit denen sich die Abgabe von Insulin und die Ansprechbarkeit der Zellen auf das Hormon manipulieren ließen – aber ohne Diabetes oder Unterzuckerung hervorzurufen. In Arbeiten aus den 1940er und 1950er Jahren stießen wir auf eine interessante Substanz: die 2-Desoxy-D-Glucose (2DG). Diese Zuckervariante war an Nagetieren gegen Krebs getestet worden, soll aber auch – so stand es zu lesen – den Insulin-Spiegel im Blut gesenkt haben.

Beim weiteren Nachforschen hatten wir ein echtes »Aha«-Erlebnis. Die Verbindung rief offensichtlich viele klassische Effekte einer eingeschränkten Kalorienzufuhr hervor, darunter niedrigere Körpertemperatur, erhöhte Glucocorticoid-Spiegel, weniger Vermehrungszyklen und reduziertes Tumorwachstum (dieser Effekt fiel fast genauso deutlich aus wie die wohl bekannte Verlängerung der Lebensdauer).

Wir durchsuchten die Literatur nach Einzelheiten über seine molekulare Wirkungsweise. So erfuhren wir, dass 2DG die Funktion eines Schlüsselenzyms blockiert, das an der Aufbereitung von Glucose in der Zelle beteiligt ist. Die Zuckerabart ähnelt strukturell dem Glucose-Molekül, weshalb sie von der Zelle leicht aufgenommen wird. Ein Enzym, das normalerweise Glucose bearbeitet, modifiziert sie zunächst. Das entstandene falsche Zwischenprodukt hemmt aber dann einen Biokatalysator des nächsten Bearbeitungsschritts. Es ist nicht einfach nur unbrauchbar, sondern beeinträchtigt dessen Zugriff auf das korrekte Zwischenprodukt (siehe Abbildung im Kasten rechts).

Da die Zellen nun weniger Glucose verwerten können, fallen auch weniger Nebenprodukte an – genau wie bei einer dauerhaft kalorienarmen Kost. Einige dieser Nebenprodukte sind so etwas wie Zulieferer für die ATP bildende Maschinerie der Zellkraftwerke, der Mitochondrien. Mangels Material produziert die ▷

Wie verfälschter Zucker karge Kost imitiert

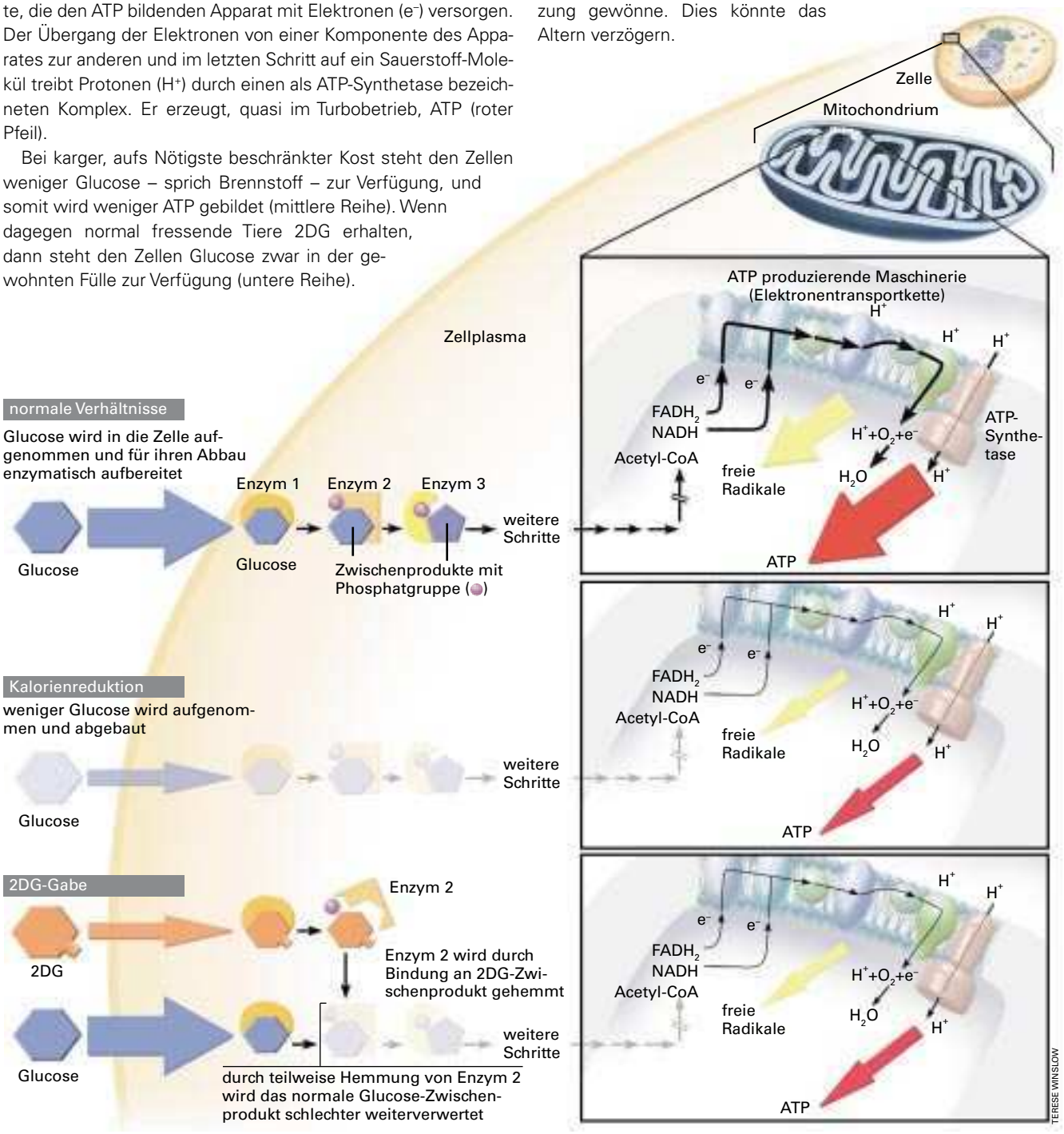
Der bestuntersuchte Kandidat für ein Mittel, das die Effekte einer dauernden energiearmen Ernährung nachahmt, ist ein Zuckerabkömmling namens 2-Desoxy-D-Glucose, kurz 2DG. Er greift in den Glucose-Stoffwechsel der Zelle ein. Beim Menschen kann er allerdings nicht angewendet werden, da er bei Tieren ab einer bestimmten Dosierung giftig wirkt. Die Versuche mit ihm haben jedoch bewiesen, dass chemische Verbindungen die Nutzeffekte einer Kalorienreduktion imitieren können. Die Kunst besteht nun darin, die für den Menschen richtige zu finden.

Zellen nutzen Glucose – Traubenzucker – aus der Nahrung zur Produktion von Adenosintriphosphat, ATP, das dann als eine Art universeller und dabei direkter Energiespender für zahlreiche Aktivitäten dient. Aufgenommene Glucose (blaues Sechseck, obere Reihe) wird schrittweise durch Enzyme modifiziert und abgebaut, zunächst im Zellplasma, dann in den Mitochondrien, den Kraftwerken der Zellen. Dabei entstehen wichtige Nebenprodukte, die den ATP bildenden Apparat mit Elektronen (e^-) versorgen. Der Übergang der Elektronen von einer Komponente des Apparates zur anderen und im letzten Schritt auf ein Sauerstoff-Molekül treibt Protonen (H^+) durch einen als ATP-Synthetase bezeichneten Komplex. Er erzeugt, quasi im Turbobetrieb, ATP (roter Pfeil).

Bei karger, aufs Nötigste beschränkter Kost steht den Zellen weniger Glucose – sprich Brennstoff – zur Verfügung, und somit wird weniger ATP gebildet (mittlere Reihe). Wenn dagegen normal fressende Tiere 2DG erhalten, dann steht den Zellen Glucose zwar in der gewohnten Fülle zur Verfügung (untere Reihe).

2DG behindert jedoch ein Schlüsselenzym. Ein Großteil der Glucose kann nicht zum Abbau vorbereitet werden, was letztlich die ATP-Produktion drosselt.

Wie aber könnte die Drosselung von Glucose-Stoffwechsel und ATP-Synthese das Altern verzögern? Eine mögliche Erklärung sehen Wissenschaftler im verminderten »Ausstoß« freier Radikale, beim Betrieb des ATP bildenden Apparats. Diese reaktionsfreudigen Verbindungen sollen, indem sie Zellen schädigen, zum Altern beitragen, auch zu solchen altersbedingten Krankheiten wie Krebs. Eine andere Hypothese geht davon aus, dass die reduzierte Bearbeitung aufgenommener Glucose den Zellen möglicherweise Nahrungsknappheit signalisiert (selbst wenn keine besteht). Die Zellen würden dann auf einen Modus umschwenken, bei dem der Erhalt des Körpers Vorrang vor derartigem »Luxus« wie Wachstum und Fortpflanzung gewönne. Dies könnte das Altern verzögern.



Schmalhans sein lohnt

Nagetiere und Affen, die streng kalorienarm, aber ausgewogen ernährt werden, unterscheiden sich von ihren normal gehaltenen Artgenossen in vielerlei Hinsicht. Wie die sie beide betreffenden Veränderungen (A bis C) das Altern beeinflussen, bleibt zwar noch zu klären. Doch die engen Übereinstimmungen zwischen beiden Tiergruppen lassen hoffen, dass die gesundheitsfördernden und alterungsverzögernden Effekte, die bei Nagetieren schon lange belegt sind (D), für Säugetiere einschließlich des Menschen allgemein gelten. In diesem Fall sollten Verbindungen, welche die Effekte einer Kalorienreduktion nachahmen, auch Menschen zu einem gesünderen und längeren Leben verhelfen. Die mit dem Pillensymbol versehenen Effekte sind durch Einsatz von 2DG bei Ratten belegt.

Affen bleiben bei ständig karger, aber ausgewogener Kost kleiner und schlanker (links) als sonst.

Indikatoren für Veränderungen beim Wachstum, bei der Entwicklung oder im Stoffwechsel

A
- niedrigere Körpertemperatur
- spätere Geschlechtsreife
- späteres Ausreifen des Skeletts

Indikatoren für eine bessere Gesundheit

B
- geringeres Körpergewicht
- weniger Bauchfett

Indikatoren für ein vermindertes Risiko, an altersbedingten Leiden wie Diabetes und Herzproblemen zu erkranken

C
- besseres Ansprechen auf Insulin
- niedrigerer Insulin-Spiegel (nüchtern)
- niedrigerer Glucose-Spiegel (nüchtern)
- niedrigerer Cholesterin- und Triglycerid-Spiegel
- niedrigerer Spiegel des insulinähnlichen Wachstumsfaktors 1
- höhere Spiegel an HDL (»gutem« Cholesterin)
- langsamerer Rückgang beim Hormon DHEA

Effekte, die bei Nagetieren belegt sind, an Affen aber derzeit noch untersucht werden

D
- späteres Auftreten von Alterskrankheiten (einschließlich Krebs)
- häufigerer »Selbstmord« der Zellen (was zum Eindämmen von Tumorwachstum beitragen könnte)
- höhere durchschnittliche Lebensdauer
- höhere maximale Lebensspanne (ein deutliches Zeichen verlangsamten Alterns)

STUART BRADFORD; FOTOS: NATIONAL INSTITUTE ON AGING

▷ Maschinerie weniger ATP. Alles in allem bringt 2DG die Zellen in eine ähnliche Stoffwechsellage wie eine dauerhafte Kalorienreduktion, obwohl dem Körper normale Mengen an Glucose zur Verfügung stehen. Solange die Menge an noch erzeugtem ATP den Mindestbedarf der Zellen deckt, ist diese Drosselung der Maschinerie offenbar vorteilhaft.

Wieso könnte aber die Arbeit auf Sparflamme dazu beitragen, dem Altern entgegenzuwirken? Wir haben zumindest einige Vorstellungen hierüber, aber noch keine Gewissheit, dass sie zutreffen. Eine seit langem existierende Theorie des Alterns dreht sich um »freie Radikale«, reaktionsfreudige Moleküle mit einem ungepaarten Elektron. Im Körper entsteht der Löwenanteil freier Radikale, wenn der ATP bildende Apparat in Betrieb ist. Mit der Zeit, so die Annahme, verursachen diese hochreaktiven Moleküle dauerhafte Schäden an Bestandteilen der Zellen, wovon auch die ATP erzeugenden Proteinkomplexe selbst nicht verschont bleiben. Möglicherweise verlangsamen 2DG wie auch Schmalkost die Bildung freier Radikale und damit das Zerstörungswerk in den Zellen, indem sie die Produktion von ATP drosseln.

Selbsterhalt statt Sex

Der Mangel an Glucose-Nebenprodukten dürfte das Altern noch auf eine andere Weise verzögern. Einige dieser Verbindungen fördern die Abgabe von Insulin aus der Bauchspeicheldrüse, nachdem ein Organismus Nahrung aufgenommen hat. Eine geringe »Dosis« an diesen Nebenprodukten würde vermutlich die Insulin-Menge begrenzen und dadurch unerwünschte Nebenwirkungen des Hormons auf den Körper minimieren. Insulin treibt nämlich nicht nur den ATP bildenden Apparat zur Höchstleistung an, was zu einer explosionsartigen Produktion von freien Radikalen führt, sondern kann auch zu Herzerkrankungen und unerwünschter Zellwucherung beitragen.

Wenn dem ATP bildenden Apparat weniger Material angeliefert wird, so werten die Zellen das außerdem, wie wir ferner vermuten, als ein Signal für Nahrungsknappheit. Sie könnten dann auf einen Selbstschutz-Mechanismus umschalten, indem sie nicht für Erhalt und Reparatur benötigte Aktivitäten – wie etwa die Vermehrung – hemmen. Dies hieße, sie würden die vorhandene Energie weitestgehend in die Sicherung ihrer Unversehrtheit investieren. Damit ließe sich erklären, warum Schmalkost die Produktion von Selbstschutz-Substanzen steigert, welche die Zellen bei starker Hitze und anderm Stress schützen.

Dieses Umschwenken auf einen Selbsterhaltungsmodus – zu Lasten der Vermehrung – würde auf Zellebene etwas widerspiegeln, was bei Organismen in Zeiten von Nahrungsknappheit passieren sollte. Nach einer inzwischen weithin anerkannten Theorie des Alterns, entwickelt von Thomas Kirkwood an der englischen Universität Newcastle, muss jedes Lebewesen mit seiner Energie haushalten und zwischen verschiedenen Prioritäten Kompromisse schließen: so zwischen

Selbsterhalt und Fortpflanzung. Bei reichen Ressourcen können sich die Lebewesen beides leisten – sich selbst zu erhalten sowie zu wachsen und sich fortzupflanzen. Selbst bei guter Versorgung soll aber – so Kirkwood – die Fortpflanzung energetisch zu Lasten der Selbsterhaltung gehen, sodass Reparaturmechanismen im Körper zu kurz kommen. Wird hingegen die Nahrung knapp, aktiviere der Körper Prozesse, die Wachstum und Fortpflanzung unterbinden, kümmere sich also in erster Linie um den eigenen Erhalt, was lebensverlängernd wirken könne.

Bei unseren ersten Experimenten mit 2DG verabreichten wir Ratten diese Substanz in geringer Menge sechs Monate lang im Futter. Das Ergebnis: Körpergewicht, Körpertemperatur und der Glucose-Spiegel morgens im nüchternen Zustand sanken mäßig, der Nüchtern-Spiegel des Insulins sogar deutlich – Befunde, die mit der Wirkung einer Kalorienreduktion übereinstimmten. Interessanterweise fraßen die Tiere der 2DG-Gruppe, nach einer anfänglichen Gewöhnungsphase an die neue Kost, kaum weniger als ihre unbehandelten Artgenossen. Wie diese aufregenden vorläufigen Analysen zeigten, ließen sich zumindest einige positive Effekte einer Kalorienreduktion nachahmen, ohne die Nahrungsaufnahme zu vermindern.

Kurz nachdem wir diese Ergebnisse 1998 veröffentlicht hatten, entdeckten andere Forschergruppen nach und nach weitere Wirkungen von 2DG analog einer Kalorienreduktion. Mark Mattson beispielsweise, damals an der Universität von Kentucky in Lexington tätig, hatte schon früher mit seinen Kollegen festgestellt, dass ein Nervengift das Gehirn von Nagern weniger schädigte und auch geringere Verhaltensdefizite verursachte, wenn die Tiere bei karger Kost gehalten wurden. Als die Forscher nun Nagetiere mit 2DG physiologisch kurz hielten, beobachteten sie die gleiche schützende Wirkung auf Nervenzellen.

Tödlicher Haken

Mittlerweile laufen bei uns Langzeitstudien an Nagetieren mit 2DG. Die bisherigen Resultate bestätigen unsere ersten Befunde, dass die Substanz Blutzucker und Körpertemperatur leicht senkt. Uns interessiert natürlich nun insbesondere, ob 2DG seltener Krebs auftreten lässt und ob es die Lebensdauer verlängert, wenn die Tiere es von klein auf, ab der

Die Aufgabe heißt nun, andere Substanzen zu finden, die unbedenklicher, aber ebenso wirksam sind wie 2DG

Entwöhnung, in niedrigen Dosen im Futter erhalten. Im Prinzip funktioniert nach den bisherigen Erkenntnissen das Konzept, den Glucose-Stoffwechsel zu hemmen; denn zahlreiche Effekte einer Kalorienreduktion wurden imitiert. Leider hat 2DG jedoch einen Haken, einen tödlichen sogar, und der macht unsere Hoffnung zunichte, schon das gesuchte Wundermittel zu haben. Zwar ist es in bestimmten niedrigen Dosen unbedenklich, kann aber offenbar für einige Tiere toxisch werden, wenn es lange Zeit oder in geringfügig höherer Dosis verabreicht wird. Der schmale Grat zwischen nützlicher und schädlicher Dosierung verbietet den Einsatz von 2DG beim Menschen. Wir hoffen, dass die schmale Sicherheitsspanne kein generelles Merkmal von Kalorienreduktions-Mimetika ist.

Vorausgesetzt unsere Langzeitstudien bestätigen, dass ein Drosseln des Stoffwechsels das Altern verzögert, dann heißt es erst einmal, andere Substanzen zu finden, welche die Nutzeffekte von 2DG entfalten, aber weniger Sicherheitsprobleme aufwerfen. Verschiedene Kandidaten haben sich in ersten Studien als viel versprechend erwiesen. Dazu gehört Jodacetat, das Mattson mit seinem Team zurzeit am Labor für Neurowissenschaften des Nationalen Altersinstituts untersucht. Bei Tieren scheint dieser Stoff die Hirnzellen vor den Angriffen toxischer Substanzen zu schützen. Medikamente, die Zellen besser auf Insulin ansprechen lassen und eigentlich zur Behandlung der Zuckerkrankheit gedacht sind, könnten ebenfalls nützlich sein – sofern die nötige Dosis den Blutzucker-Spiegel nicht zu tief fallen lässt.

Als Reaktion auf karge Kost können sich freilich auch andere Aspekte des Stoffwechsels verändern, nicht nur der von Glucose. Wenn der Körper der aufgenommenen Nahrung nicht genügend Glucose entziehen kann, wird er versuchen, auf anderen Wegen Energie zu gewinnen. Beispielsweise könnte er Eiweiß und Fett abbauen. Pharmaka, die auf diese Prozesse abzielen, eignen sich daher möglicherweise ebenfalls, entweder allein oder in Kombination mit Substanzen, die in den Glucose-Stoffwechsel eingreifen. Man kennt zwar einige Verbindungen, die bei den alternativen Stoffwechselwegen ansetzen, doch ist ihr Potenzial als Kalorienreduktions-Mimetika bislang noch nicht wissenschaftlich überprüft.

Stoffe, die nur bestimmte Effekte einer Kalorienreduktion imitieren, könnten ebenfalls eine Rolle spielen. Theoretisch kommen antioxidative Vitamine wie E und C in Frage, doch den bisherigen Studien zufolge wird dieser spezielle Eingriff die Lebensdauer wohl nicht verlängern.

Anders als die Fülle an Elixieren, die als neueste Mittel gegen das Altern gepriesen werden, würden Kalorienreduktions-Mimetika grundlegende Prozesse des Alterns verändern. Unser Ziel ist daher: unbedenkliche Verbindungen zu entwickeln und mit ihnen Zellen zu verleiten, Bewahrungs- und Reparaturmechanismen zu aktivieren. Wir würden Menschen zu besserer Gesundheit und zu längerem Leben verhelfen – ohne Kasteien. Die Aufgabe ist schwierig, aber offenbar nicht länger unmöglich. ◁

Mark A. Lane ist seit März 2002 Projektmanager beim Pharmaunternehmen Merck in Rahway (New Jersey). **Donald K. Ingram** leitet die Abteilung Verhaltensneurowissenschaften am Forschungszentrum des Labors für Neurowissenschaften des Nationalen Altersinstituts in Bethesda (Maryland). **George S. Roth**, der fast dreißig Jahre am Institut tätig war, wirkt nun dort als Gastwissenschaftler. Er ist Vorstandsvorsitzender des Biotech-Unternehmens GeroTech.

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

Länger leben bei karger Kost. Von R. Weindruch in: Spektrum der Wissenschaft, März 1996, S. 74.

Caloric Restriction in Primates and Relevance to Humans. Von George S. Roth et al. in: Annals of the New York Academy of Sciences, Bd. 928, S. 305, 2001.

2-Deoxy-D-Glucose Feeding in Rats Mimics Physiological Effects of Caloric Restriction. Von Mark A. Lane et al. in: Journal of Anti-Aging Medicine, Bd. 1, Nr. 4, S. 327, 1998.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

HighChem gegen Flöhe

Moderne Flohmittel bekämpfen Parasiten an der Wurzel

Von Mark Fischetti

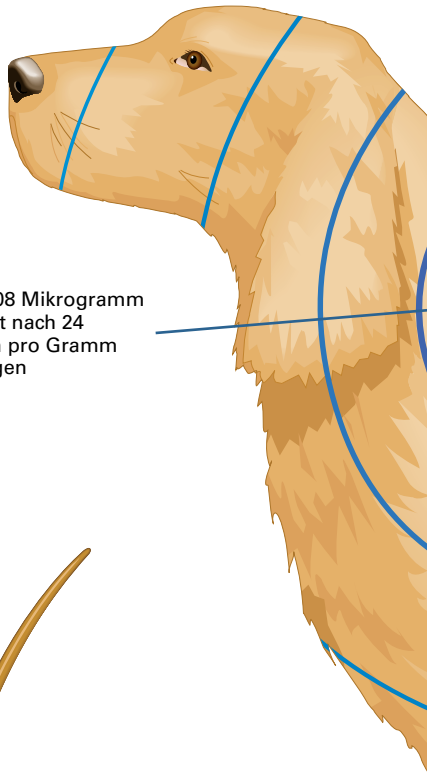
Wenn Katzen durchs Gebüsch schleichen und Hunde sich im Gras wälzen, freut das auch Blut saugende Parasiten. Mit allerlei Mitteln versuchen Tierhalter, insbesondere einen Befall durch Flöhe oder – wenn es denn schon zu spät ist – ihre Vermehrung im Fell des Lieblings zu verhindern. Shampoos, Puder, Sprays und Halsbänder sind mögliche Darreichungsformen, besonders wirksam sind aber Tropfen. Einige wenige davon, auf die Haut im Nackenbereich von Hund und Katze aufgebracht, verhindern einen Flohbefall für viele Wochen. Erhältlich sind diese »Spot On«-Produkte nur beim Tierarzt, die Packungsgröße entspricht der Dosierung je nach Gewichtsklasse.

Die Wirkstoffe vermischen sich mit dem Hautfett, das den gesamten Körper überzieht. Einige Produkte werden auch in den Talgdrüsen der Haarfollikel gespeichert und kontinuierlich an die Hautoberfläche abgegeben. Marktführend sind derzeit Produkte mit dem Wirkstoff Fipronil der Firma Merial beziehungsweise mit dem Wirkstoff Imidacloprid der Firma Bayer Tiergesundheit. Beide Präparate verteilen sich innerhalb von weniger als zwölf Stunden nach dem Auftragen über die gesamte Körperoberfläche und bereits einen halben Tag nach der Behandlung sind über neunzig Prozent der geschlechtsreifen Flöhe tot. Untersuchungen der Firma Bayer haben ergeben, dass die Konzentration von Imidacloprid in der Hundehaut nach 28 Tagen auf 1 ppm *(part per million)* gesunken ist, was nach Firmenangabe noch immer das Zehnfache der Menge ist, die einen erwachsenen Floh tötet. Da sich die Wirkstoffe in oder auf der Haut anreichern, werden sie zudem nicht so leicht ausgewaschen, wie es bei Präparaten der Fall ist, die dem Tierhaar anhaften. Spot-On-Präparate töten praktisch alle Flöhe innerhalb von 18 Stunden und verhindern so, dass neue Eier gelegt werden.

Gegner der Spot-On-Behandlung kritisieren, dass die Wirkstoffmengen, die Tiere bei ihrer Körperpflege oral aufnehmen, diesen schaden können. Doch von der Zulassungsbehörde beispielsweise zu Fipronil angeforderte Untersuchungen ergaben, dass »selbst bei Tieren, denen eine hohe Überdosis verabreicht worden war, keine Abweichungen der Leber- und Nierenwerte auftraten«. Eine Alternative sind Tabletten, also Präparate, die systemisch wirken und mit dem Blutstrom verteilt werden. Hier muss der Parasit jedoch erst einmal Blut saugen, um in Kontakt mit dem Insektizid zu kommen. Einige dieser »Anti-Floh-Tabletten« haben keine Wirkung auf das erwachsene Tier, sondern hemmen allein die Entwicklung der Larve im Ei.

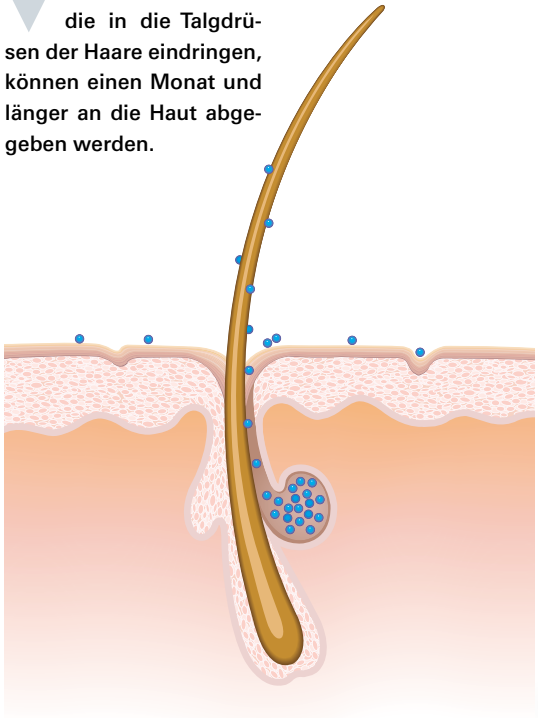
Doch jedes Insektizid belastet den Körper des Tieres – das ist nicht zu vermeiden. Eine hundertprozentige Sicherheit, dass langfristig keine Folgeschäden auftreten, kann es nicht geben. Deshalb kommen auch Präparate auf den Markt, die sich als biologische oder chemiefreie Alternative bezeichnen und die auf Vitamin-B- oder Knoblauch-Gabe setzen. Allerdings ist deren Wirksamkeit wissenschaftlich nicht erwiesen beziehungsweise zum Teil sogar widerlegt.

Spot-On-Präparate vermischen sich mit den hauteigenen Körperfetten und verteilen sich schnell über die gesamte Körperoberfläche. Bereits ein paar Tropfen genügen. Auch nach vier bis sechs Wochen reicht die Wirkstoffkonzentration, um geschlechtsreife Flöhe zu töten.



Typische Konzentration: 308 Mikrogramm pro Gramm Körpergewicht nach 24 Stunden / 7,4 Mikrogramm pro Gramm Körpergewicht nach 56 Tagen

Insektizide (blau), die in die Talgdrüsen der Haare eindringen, können einen Monat und länger an die Haut abgegeben werden.



ILLUSTRATIONEN: GEORGE RETSECK

Mark Fischetti ist Mitarbeiter von »Scientific American«. Für die fachliche Unterstützung danken wir **Christian Epe**, Parasitologe an der Tierärztlichen Hochschule Hannover.

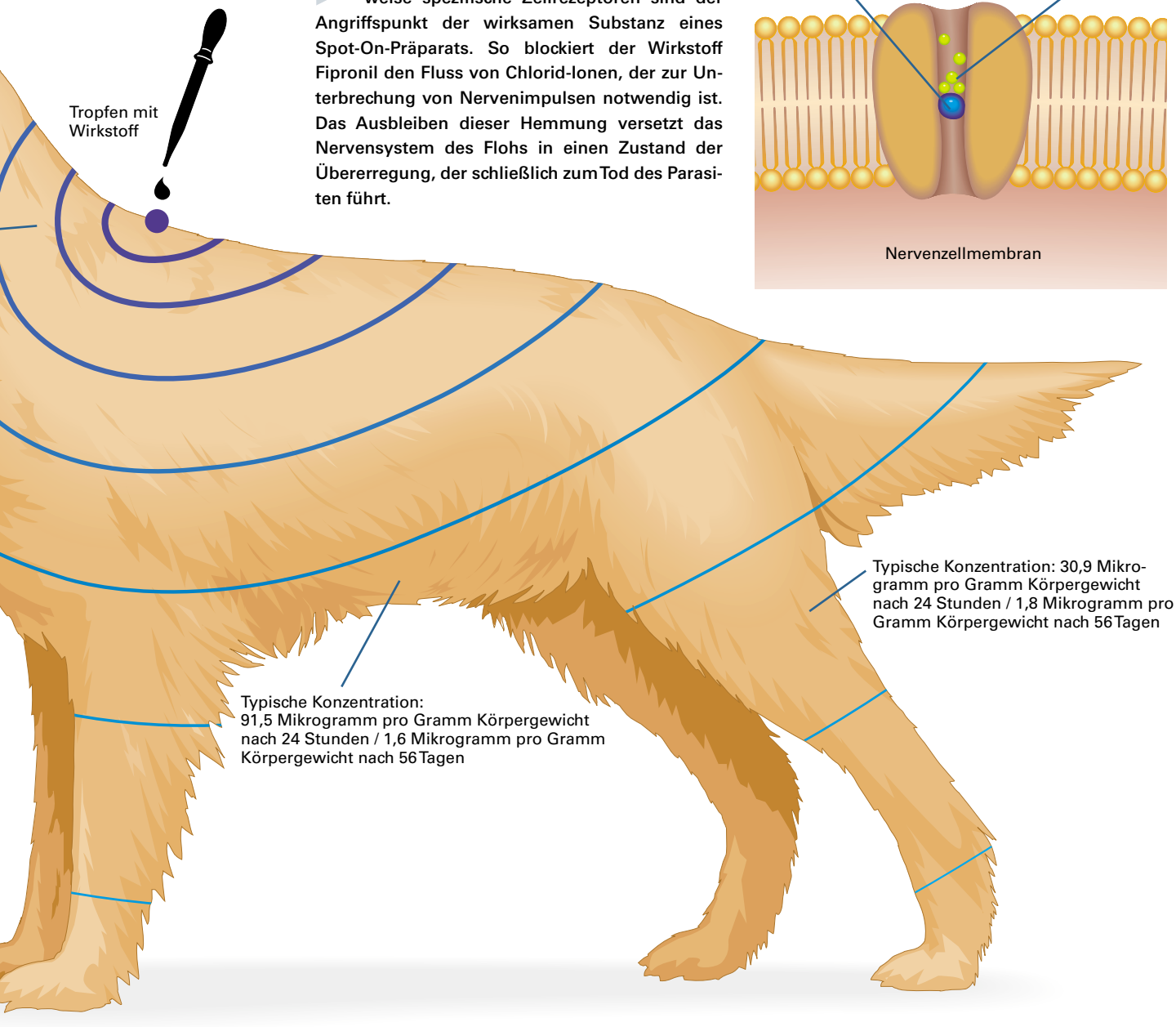
WUSSTEN SIE SCHON?

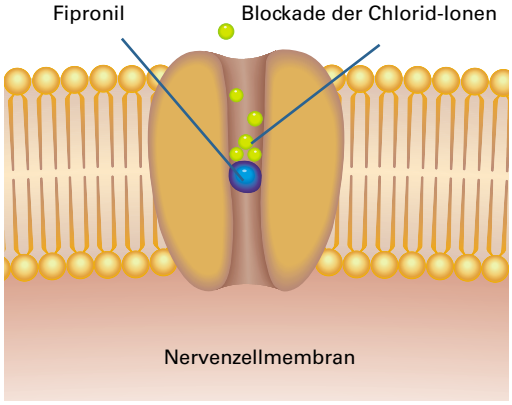
Rückgang der FAD: Während eines Flohbisses gelangt immer auch ein wenig Flohspeichel in die Haut. Dieser kann eine allergische Reaktion mit Hautrötungen und Juckreiz bis hin zur Flohallergie-Dermatitis (FAD) hervorrufen. Jahrelang war die FAD die häufigste Hauterkrankung von Hund und Katze, dank der Spot-On-Behandlungen kommt sie in den letzten Jahren immer seltener vor.

Der Schwarze Tod: Rattenflöhe können mit ihrem Stich die Erreger der Beulenpest übertragen, die im 14. Jahrhundert ein Drittel der Bevölkerung Europas auslöschte. 1999 wiesen Mikrobiologen in den USA bei Eichhörnchen und Nagetieren mit Flohbefall aus 22 Bezirken in der Umgebung von Sacramento (Kalifornien) Pesterreger nach und im Jahr 2000 begannen dort staatliche Gesundheitsorganisationen regelmäßig Warnungen vor pestgefährdeten Gebieten herauszugeben. Experten zweifeln aber daran, dass auch der Katzenfloh die Pesterreger auf seinen Wirt übertragen kann.

Zuerst der Mensch, dann das Tier: 1762 gründeten die Franzosen in Lyon die erste veterinärmedizinische Fakultät der Welt. Das ursprüngliche Ziel der Veterinärmedizin war nicht so sehr das Wohl der Tiere, vielmehr war man um ein besseres Verständnis der vom Tier auf den Menschen übertragenen Krankheiten (Zoonosen) bemüht. Die erste veterinärmedizinische Bildungsstätte wurde dementsprechend 1778 in Hannover gegründet, um die damals grassierenden Pferde-Seuchen zu erforschen.

Das Nervensystem des Flohs beziehungsweise spezifische Zellrezeptoren sind der Angriffspunkt der wirksamen Substanz eines Spot-On-Präparats. So blockiert der Wirkstoff Fipronil den Fluss von Chlorid-Ionen, der zur Unterbrechung von Nervenimpulsen notwendig ist. Das Ausbleiben dieser Hemmung versetzt das Nervensystem des Flohs in einen Zustand der Übererregung, der schließlich zum Tod des Parasiten führt.





Rechenleistung aus der Steckdose

Durch die Einbindung von Prozessoren, Speichersystemen und Software in eine weltumspannende Struktur wird die Leistung eines Computers für jedermann auf der Stelle und problemlos verfügbar.

Von Ian Foster

Die ersten Menschen aßen nur selbst gefangene Nahrung und benutzten nur selbst hergestellte Werkzeuge. In der Zwischenzeit haben sich unsere Vorfahren alle Mühe gegeben, diese enge Kopplung von Produktion und Verbrauch zu überwinden, und die Ergebnisse sind sehr eindrucksvoll: Landwirtschaft, industrielle Massenfertigung, zentrale Erzeugung elektrischer Energie und Verteilung über ein weitverzweigtes Netz … Die arbeitsteilige Wirtschaft mitsamt ihren ungeheuren Effizienzgewinnen macht unsere moderne Welt aus. Dank ihr kann ich zum Beispiel in einem Café sitzen, einen Espresso trinken und diesen Artikel auf einem Laptop schreiben, ohne darüber nachzudenken, wo das Wasser, die Kaffeebohnen und der elektrische Strom, die ich verbrauche, eigentlich herkommen.

Wasserhahn und Steckdose sind griffige Beispiele für das, was der Informatiker »Virtualisierung« nennt. Von einer nützlichen Funktion bleibt nur eine Oberfläche (ein *interface*) sichtbar; was dahinter steckt, kann und will ich nicht sehen. Wenn ein Angestellter des Cafés den Wasserhahn aufdreht, darf er sich schadlos der Illusion hingeben, er würde ein Fass ohne Boden anstechen. Die Steckdose, an die ich meinen Laptop anschließe, ist für mich nichts weiter als eine »Stromquelle« – eine virtuelle natürlich; aber dank moderner Infrastruktur muss ich mir über die echten Quellen des Stroms keine Gedanken machen.

Nur bei den Computern selbst sind wir noch nicht wesentlich über die Steinzeit hinaus. Mein Laptop, ein Heimcomputer und selbst das Rechenzentrum eines Großbetriebs sind in sich geschlossene Systeme, die alle notwendigen Leistungen selbst erbringen. Das wäre so, als müssten jedes Haus und jede Firma ein eigenes Kraftwerk, eine eigene Bibliothek, eine eigene Druckerei und ein eigenes Wasserwerk betreiben. Welch eine Verschwendung.

Dieser unbefriedigende Stand der Dinge hat Informatiker dazu veranlasst, nach besseren Alternativen zu suchen. Die Datenleitungen werden immer schneller; warum liefert man dem Kunden nicht das, was er braucht – Rechenleistung, Speicherplatz, Daten und Software –, zu dem Zeitpunkt, zu dem er es anfordert? Das läuft darauf hinaus, »Rechner« dynamisch aus räumlich getrennten Teilen zusammenzusetzen, also das, was ein Rechner liefert, zu virtualisieren. Ein solches Rechennetz *(computing grid)* könnte so allgegenwärtig und so nützlich sein wie das Stromnetz *(power grid)*.

Die ersten Nutznießer eines solchen Netzes

wären vermutlich Internet-Anbieter von Dienstleistungen. Sie müssten für die stark schwankende Nachfrage ihrer Kunden nach Rechenleistung nicht selbst Kapazitäten vorhalten, sondern könnten sie je nach Bedarf auf dem Markt einkaufen. Sie könnten solche Leistungen nicht nur unter eigenem Namen anbieten, sondern auch als Makler zwischen Anbietern und Nachfragern auftreten.

Geschäfte im Grid

Stellen Sie sich einen Veranstalter von Abenteuerreisen vor, der – als Vorgeschmack auf das echte Erlebnis oder als eigenständige Leistung – virtuelle Tauchtouren anbieten möchte. Wenn ein Kunde mit einem Mausklick in die Gewässer der beliebten Taucherinsel Cozumel vor der mexikanischen Küste springt, muss die Firma zu dem vom Kunden genannten Ort Standbilder in einer Datenbank ausfindig machen, die Daten in eine dreidimensionale Darstellung überführen, mit zugehörigen kommerziellen Informationen überlagern und Bilder von dort installierten Videokameras mit einspielen. Kein Reiseunternehmen kann es sich leisten, diese Kapazitäten vorzuhalten. Über das Grid jedoch können sie durch Großfirmen bereitgestellt werden, die jeweils viele Kunden bedienen und dadurch auf ihre Kosten kommen.

Mein Hausarzt hat weder das Geld noch den Bedarf für einen Supercomputer samt umfangreicher Bilddatenbank in seiner Praxis. Aber wenn ihm mein Röntgenbild merkwürdig vorkommt, wäre es hilfreich, wenn er es von einem Server in, sagen wir, Boston mit den Röntgenaufnahmen von Millionen anderer Patienten vergleichen lassen könnte. Vielleicht entdeckt er durch diesen Auftrag, der über das Grid ausgeführt und abgerechnet wird, einen bösartigen Tumor, der ihm sonst entgangen wäre. Anderswo vergibt vielleicht ein Biochemiker an das Grid den Auftrag, in einer Simulation 10 000 potenzielle Wirkstoffe durchzutesten, und hat seine Ergebnisse in einer Stunde statt in einem Jahr. Ein Bauingenieur erfährt auf dieselbe Weise in Minuten statt in Monaten, ob die von ihm entworfene Brücke einem Erdbeben standhalten würde.

Virtualisiertes Rechnen über ein weltumspannendes Netz *(global virtualized grid computing)* ist eine natürliche Fortentwicklung des Internets, das seinerseits ein virtualisiertes Kommunikationsmittel ist: Jeder Mensch oder Computer kann mit jedem anderen in Verbindung treten, und zwar unabhängig von Ort oder Übertragungsmedium. Kaum gab es das Internet, da schossen vollkommen neue Anwendungen wie Pilze aus dem Boden:

- E-Mail;
- das World Wide Web;
- dezentrale Anwendungen (P2P wie *peer-to-peer*-Systeme, siehe Spektrum der Wissenschaft 6/2002, S. 80);
- Systeme zum Tauschen von Dateien wie Napster und KaZaA sowie
- einfache Schemata für verteiltes Rechnen wie SETI@home (der Bildschirmschoner für die kollektive Suche nach außerirdischen Intelligenzen), FightAIDS @home und das Smallpox Research Grid.

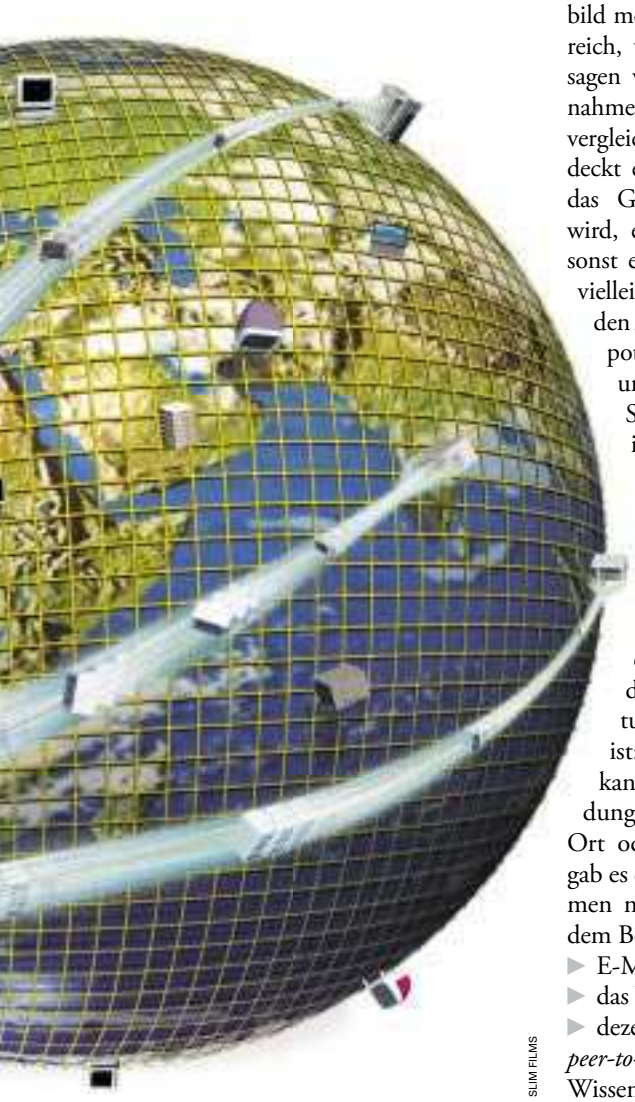
Unsere Anstrengungen, Grid Computing zu entwickeln, zielen darauf ab, Rechenleistung und Information zu virtualisieren, sodass jeder Mensch oder Computer sie an jeden anderen liefern kann, und zwar – genauso wichtig – so, dass der Zugang zu diesem sehr buntgemischten Markt sicher und zuverlässig ist.

Mein eigenes Interesse an Grid Computing erwachte Anfang der 1990er Jahre, als ich im Nationallaboratorium des Energieministeriums in Argonne (Illinois) an Software für wissenschaftliches Rechnen arbeitete. Die ersten Hochgeschwindigkeits-Datennetze kamen auf, und uns wurde allmählich klar, dass sie die Möglichkeiten wissenschaftlichen Arbeitens in ungeahntem Maße erweitern würden. So könnten Laborinstrumente ihre Messwerte an entfernte Rechner übertragen und diese eine Datenanalyse in Echtzeit durchführen. Man könnte mühelos viele räumlich weit entfernte Datenbanken zugleich abfragen und dadurch neue, interessante Zusammenhänge finden.

»Globus«, das Pioniersystem

Deshalb beschloss ich 1994, meine Forschung auf verteilte Systeme zu konzentrieren. Meine Partner waren Steven Tuecke von Argonne und Carl Kesselmann, damals Forscher am California Institute of Technology in Pasadena und heute Direktor des Zentrums für Grid-Technik am Institut für Informatik der Universität von Süd-Kalifornien in Los Angeles. Wir drei riefen ein Projekt ins Leben, das ein Softwaresystem für die globale wissenschaftliche Zusammenarbeit zum Ziel hatte, und nannten es – ohne falsche Bescheidenheit – »Globus«.

Verteiltes Rechnen ist keineswegs eine neue Idee; viele Grundkonzepte der heutigen Grid-Systeme sind sogar älter als das Internet. Die Schöpfer der ersten Mehrbenutzer-Betriebssysteme *(time sharing systems)*, namentlich Fernando Corbató vom Massachusetts Institute of Technology, dachten bereits Anfang der sechziger Jahre weit über die damaligen technischen Möglichkeiten hinaus: Miteinander verbundene Computer würden »eine Forschergruppe zu kooperativer Suche nach der Lösung eines gemeinsamen Problems zusammenbringen«. Banken und Fluggesellschaften betreiben seit Jahrzehnten hochentwickelte verteilte (Buchungs-)Systeme. ▷

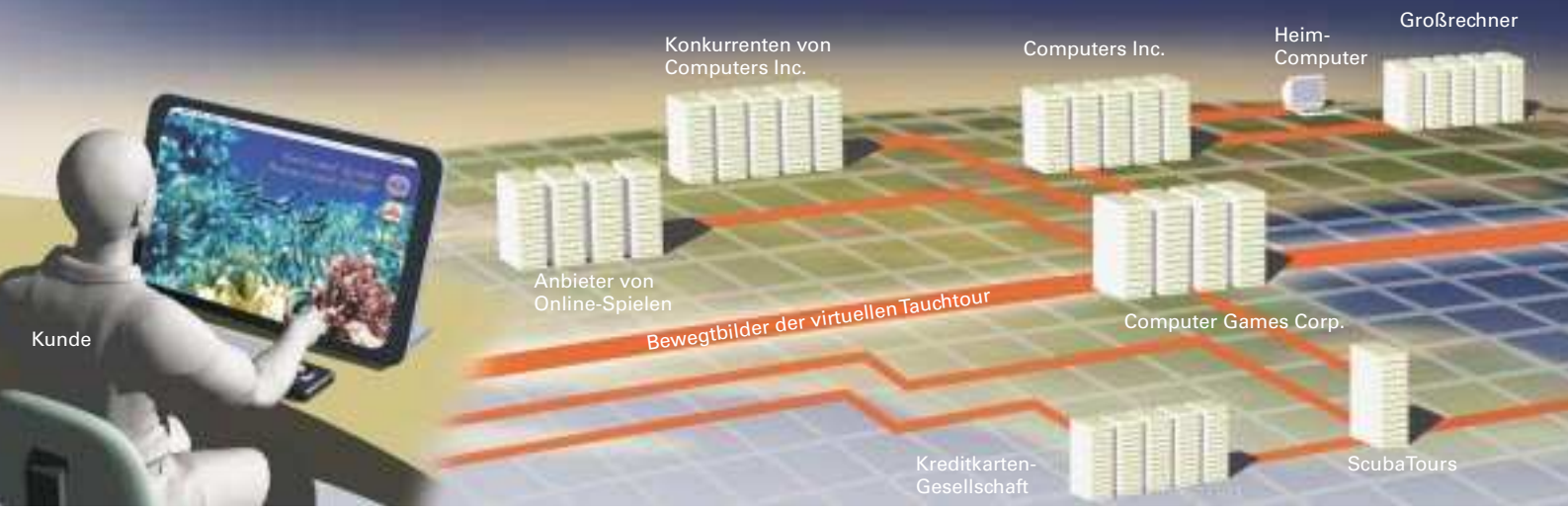


SLIM FILMS

Der Espresso-Computer: Auf der Stelle serviert mir das Grid ein Bild oder das Ergebnis einer Dateisuche. Woher es seine Rohstoffe bezieht, interessiert mich nicht.

Zukunftsszenario: Die virtuelle Tauchtour

Der Abenteuerreiseveranstalter ScubaTours bietet virtuelle Erkundungen seiner Tauchplätze an. Nur mit PC und Joystick ausgestattet, kann der Kunde vom heimischen Lehnsessel aus durch eine dreidimensionale Darstellung eines Korallenriffs »schweben« – in diesem Fall vor der Küste der beliebten mexikanischen Ferieninsel Cozumel. Aus der in einer Datenbank vorliegenden Gestalt des Riffs in Echtzeit die Ansicht für den Kunden auszurechnen, erfordert einen Supercomputer. Gleichwohl kann auch eine kleine Firma wie ScubaTours die Leistung anbieten, weil sie bei Bedarf über das Grid die erforderlichen Ressourcen anmietet. Sowie der Kunde virtuell ins Wasser steigt, beauftragt der Computer von ScubaTours einen Server in, sagen wir, Arizona,



GEORGE RETSECK

▷ Wir hatten allerdings eher die Bedürfnisse von Wissenschaftlern im Sinn. Die Praxis der Forschung ist häufig ein nur mühsam gebändigtes Chaos. Überraschende, extreme Anforderungen an – zum Beispiel – Rechengerät sind nur durch sehr innovatives Denken zu befriedigen. Es ist kein Zufall, dass die Erfindung des World Wide Web durch Tim Berners-Lee im europäischen Kernforschungszentrum Cern in Genf stattfand.

In unserem Fall erkannten wir, dass Forschergruppen, die aus verschiedenen Institutionen zusammengewürfelt sind – wir nannten sie virtuelle Organisationen (VOs) –, einen kontrollierten und gut verwalteten Zugriff auf gemeinsame Ressourcen benötigen. Eine VO hat gewisse Parallelen zu einer Fußball-Nationalmannschaft, deren Mitglieder ja auch aus den verschiedensten Vereinen zusammengezogen werden. Aber sie hat ein schwierigeres Leben, denn ihre Mitglieder bleiben fest im jeweiligen »Heimatverein« verankert, was zahlreiche organisatorische und politische Problemen schafft. Sie tragen nicht die gleichen Trikots, sprechen nicht die gleiche Sprache, folgen nicht den gleichen Regeln oder spielen vielleicht nicht einmal das gleiche Spiel.

Kesselman, Tuecke und mir schwebte eine neue Klasse von integrierender Software vor, die diese gemeinsame Nutzung ermöglichen würde; und zwar wollten wir nicht die Systeme an den einzelnen Orten durch eigene ersetzen, sondern unsere VO-Struktur – kostengünstig – auf die bestehenden Systeme aufsetzen. Dazu musste unsere Software standardisierte Lösungen für eine Vielzahl von Aufgaben vorsehen, darunter vor allem

- die Identität eines Nutzers zu überprüfen,
- einen Auftrag zur Ausführung freizugeben,
- über verfügbare Ressourcen Buch zu führen und sie zugänglich zu machen,
- Datenströme zu lenken.

»I-WAY«, das Gesellenstück

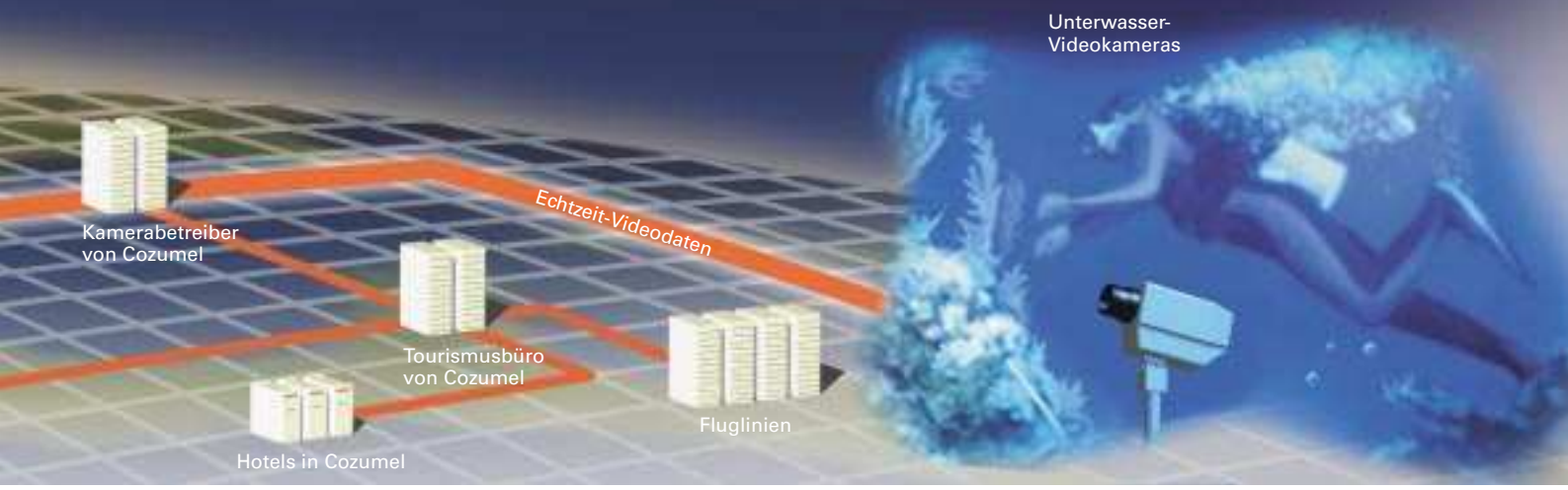
Die Bewährungsprobe für unsere Ideen kam früher als erwartet. Für die Dauer einer Industriekonferenz namens Supercomputing '95 wollten Rick L. Stevens, Direktor der Mathematik- und Informatikabteilung in Argonne, und Thomas A. DeFanti, Direktor des Visualisierungslabors der Universität von Illinois in Chicago, elf lokale Hochleistungs-Computernetze zu einem Grid namens »I-WAY« zusammenkoppeln. Als sie Ende 1994 das noch aufzubauende Grid zur Nutzung ausschrieben, gingen mehr als sechzig Anträge von Wissenschaftlern ein.

Stevens und DeFanti überredeten mich und eine kleine Gruppe von Mitarbeitern bei Argonne, die Software zu entwickeln, welche die 17 an I-WAY teilnehmenden Standorte zu einem einzigen virtuellen System verknüpfte. Auf dieser Basis baute zum Beispiel eine Gruppe unter Leitung von Lori Freitag von Argonne ein Netzwerk auf, in dem Verbrennungsingenieure aus den ganzen USA gemeinsam industrielle Verbrennungsanlagen optimieren konnten.

I-WAY war ein großer Erfolg und zog weite Kreise. DARPA, die Forschungsförderungsagentur des Verteidungsministeriums, gab dem Projekt Globus Geld für weitere Forschungen. Im Jahre 1997 veröffentlichten wir die erste Version unseres Softwarepakets »Globus Toolkit« und demonstrierten sein Funktionieren an über achtzig Standorten in aller Welt. Zugleich förderte die National Science Foundation den Aufbau des National Technology Grid, das Wissenschaftlern an Universitäten den Zugang zu schnellen Rechnern verschaffen sollte; die Nasa gründete ein ähnliches Projekt namens Information Power Grid, und das Energieministerium förderte Projekte zur wissenschaftlichen Nutzung von Grids.

Ende der 1990er Jahre wuchsen und gediehen zahlreiche weitere Grids. So erkannten die Hochenergiephysiker, die den Teilchenbeschleuniger LHC (Large Hadron Collider) am Cern entwarfen,

die erforderlichen Daten und Programme herbeizuschaffen und zu verarbeiten. Der Server reicht Teile des Auftrags an andere Computer weiter und fügt passende Werbung sowie Bilder von im Meer installierten Videokameras hinzu. All das zusammen erzeugt die frappierende Illusion einer echten Tauchtour. Scuba erwirbt diese Leistungen teilweise über langfristige Mietverträge, zum anderen Teil auf einer Art »Spotmarkt«. Dessen Anbieter und Makler (wie Computer Games Corp. und Computers Inc.) bedienen jeweils zahlreiche Kunden und erzielen dadurch die Vorteile der Massenproduktion. Andere Anbieter im Grid regeln die Vertrauenswürdigkeitsprüfung, den Zahlungsverkehr und Ähnliches (weitere Einzelheiten am Schluss des Artikels).



dass für die Analyse der zu erwartenden riesigen Datenmengen ein Grid-System unentbehrlich sein würde. Zu dessen Aufbau wurden mehrere Projekte ins Leben gerufen, namentlich das europäische DataGrid, aber auch das U.S. Grid Physics Network und das Particle Physics Data Grid in den Vereinigten Staaten. In ihrem Gefolge entstanden neue Infrastrukturen, Benutzergemeinschaften und Anwendungsprogramme.

Ein Grid lebt davon, dass alle seine Komponenten nahtlos zusammenpassen, auch wenn sie, wie in der Wissenschaft üblich, über die ganze Welt verteilt sind. Für dieses Ziel war es zwar hilfreich, dass fast allen Entwicklungen von Grids der Globus Toolkit zugrunde liegt. Aber es war klar, dass Grid Computing kaum über den Kreis seiner ursprünglichen Benutzer hinauswachsen würde, wenn nicht alle Benutzer an der Festsetzung gemeinsamer Standards beteiligt wären. Deshalb beriefen 1998 mehrere von uns ein erstes Treffen ein, aus dem später das Global Grid Forum hervorging: eine internationale Standardisierungsorganisation der Benutzergemeinde.

Das Grid selbst ist Infrastruktur und als solche nicht besonders erregend. Wie beim Abwassersystem ist es am besten, wenn man von ihm nichts bemerkt, außer dass es funktioniert. Einige virtualisierte Projekte jedoch, die durch das Grid erst möglich wurden, sind in der Tat bemerkenswert.

GLOSSAR

- Der Begriff **Grid Computing** bezeichnet die (über Hochgeschwindigkeits-Datennetze zu realisierende) Einbindung zahlreicher Computer in eine einheitliche Struktur, mit dem Ziel, deren hohe Leistung bei Bedarf sofort für jeden Nutzer – ob Mensch oder Computer – verfügbar zu machen, insbesondere für solche, die ansonsten keinen Zugang zu derartigen Leistungen hätten.
- »Think global – act local«: Über **gemeinsame Sprachen und Interaktionsprotokolle** befriedigt ein Grid lokale Bedürfnisse mit über die ganze Welt verteilten Produktionsmitteln.
- Die hochintegrierten Netze, aus denen das Grid besteht, sind **für den Nutzer transparent**: Es scheint, als würden die aus der Ferne gelieferten Dienstleistungen von lokalen Rechnern erbracht.
- Die Grid-Technik ermöglicht enge wissenschaftliche und geschäftliche Zusammenarbeit von Mitgliedern virtueller Organisationen, wissenschaftliche Experimente aus der Ferne sowie **verteiltes Hochleistungsrechnen und Datenanalyse**.

Vom etablierten System ...

Seit im 16. Jahrhundert Galileo Galilei sein Fernrohr auf die Monde des Jupiter richtete, gehören lange, kalte Nächte in der Sternwarte zum Schicksal des Astronomen. Dank großer Fortschritte in Rechner- und Sensortechnik ist jedoch eine neue Generation von »Lehnstuhlastronomen« im Kommen. Statt nachts vor dem Teleskop zu frieren, sitzen sie tagsüber in wohlig geheizten Büros und weisen ihre Rechner an, nicht den Himmel selbst, sondern eine entsprechende Datensammlung nach auffälligen Objekten zu durchmustern. Das knappe Gut, um das sie kämpfen müssen, ist nicht mehr die Beobachtungszeit; es sind die Software, der Speicherplatz und die Rechenzeit, die zur Analyse der riesigen Datenmengen benötigt werden.

Eine dieser Datensammlungen ist der Sloan Digital Sky Survey. Das Projekt, das bislang größte seiner Art, zielt darauf ab, ein Viertel der Himmelskugel zu kartografieren, insbesondere Position und absolute Helligkeit von mehr als 100 ▷

▷ Millionen Himmelsobjekten zu bestimmen; das erfordert einen immensen Rechenaufwand. Eine Gruppe von Forschern aus der Universität Chicago, dem Fermilab und der Universität von Wisconsin in Madison will mit Hilfe des Grids diese Arbeit beschleunigen. Indem wir Rechnerressourcen aus dem ganzen Land einspannen, soll eine Analyse, die bisher Wochen in Anspruch nahm, nicht länger dauern als eine Kaffeepause.

Diese Gruppe hat bereits einen Katalog von Galaxienhaufen angelegt – wertvolles Material für Kosmologen, die an Theorien zur Entstehung des Universums arbeiten. Als Nächstes steht eine Suche nach erdnahen Objekten an, ein Thema mit ungewöhnlich direktem Bezug zum Schicksal unseres Planeten. Immerhin könnte einer der so zu entdeckenden Asteroiden irgendwann auf der Erde einschlagen. Die Ergebnisse dieses Projektes gehen in ein noch ehrgeizigeres Unterfangen ein: viele solcher astronomischer Datenbanken zu einem globalen virtuellen Observatorium zu verbinden.

Auch die klinische Medizin profitiert von der Grid-Technik. Die neuen bildgebenden Verfahren liefern eine Fülle von Daten; dadurch ist es einfacher geworden, den Verlauf einer Krankheit bei einem einzelnen Patienten oder dasselbe Krankheitsbild in einer Vielzahl von Fällen zu verfolgen. Aber die riesige Flut von Bilddaten will auch bewältigt werden. Nach Einschätzung von Experten werden derzeit ungefähr ein Fünftel der erstmaligen Mammografien falsch diagnostiziert. Außerdem sind ältere Aufnahmen in zwanzig Prozent aller Fälle nicht aufzufinden. Diesen Missständen sollen digitale Bildarchive wie das National Digital Mammography Archive in den USA und eDiamond in Großbritannien abhelfen. Diese Grid-Systeme verschaffen darüber hinaus den Medizinern Zugang zu modernsten automatischen Diagnosesystemen und liefern den Epidemiologen Material, um die Auswirkungen von Umwelt und Lebensstil auf die Gesundheit zu erforschen (Kasten unten).

... zum allgemeinen Standard

Das U.S. Biomedical Informatics Research Network sammelt Computertomografie-Daten aus verschiedenen Quellen, vor allem Aufnahmen des Gehirns. Vielleicht hilft dieses Grid uns zu verstehen, wie Strukturen im Gehirn späterer Alzheimerpatienten sich von denen gesunder Menschen unterscheiden.

Das U.S. Network for Earthquake Engineering Simulation (NEES) ist mit der Simulation von Erdbebenfolgen befasst. Ein Bauingenieur pflegt eine Struktur, die einem Erdbeben standhalten soll, in eigens dafür eingerichteten Anlagen zu testen, die Rütteltische und Zentrifugen enthalten. Ein Teil der Fördersumme von 82 Millionen Dollar wird in ein NEESgrid fließen, das bereits vorhandene und neu zu bauende Testeinrichtungen mit Datenarchiven, Rechnerressourcen und Nutzern im ganzen Land verbinden soll. Dann können Forscher Experimente aus der Ferne mitverfolgen. Für diesen Sommer ist eine Studie über große Brückenpfeiler geplant, die gleichzeitig auf Rütteltischen in Kalifornien und Illinois getestet werden.

Nicht nur die Wissenschaftler begeistern sich für die Möglichkeiten des Grid Computing. Seit 2000 arbeiten praktisch alle namhaften Computerhersteller an kommerziellen Anwendungen der Technik. Schlagwörter wie »Utility Computing«, »e-business on demand«, »planetary computing«, »autonomic computing« und »enterprise grids« finden sich immer häufiger in Marketingunterlagen und Geschäftsplänen.

Das lebhafte Interesse erklärt sich ohne weiteres aus der endlosen, kostspieligen Mühsal des Computerbetriebs. Dieses Geschäft ist bis heute nicht weit über das Niveau der Handarbeit hinaus gekommen. Wir wissen alle, dass Benutzer viel zu viel Zeit damit verbringen, ihre privaten Systeme zu installieren, am Laufen zu halten, Fehler zu beheben und neue Komponenten einzubringen, die dann mit den alten nicht richtig zusammenarbeiten. Grid Computing verspricht, diese Probleme zu bewältigen, indem es Produktion und Verbrauch entkoppelt und damit allgemeine und spezielle Leistungen eines Computers zu handelbarer Ware macht.

Ein verteiltes Archiv für digitale Brustaufnahmen

Grid Computing rückt bisher undurchführbare Aufgaben in den Bereich des Möglichen, indem es räumlich weit entfernte Rechen- und Speicherkapazitäten verfügbar macht. Ein Anwendungsfall ist die digitale Mammografie. Sie liefert genauere Diagnosen als die klassische Röntgenaufnahme der Brust; aber allein in den USA könnten täglich 28 Terabyte (28 Millionen Megabyte) an Bilddaten anfallen, die gespeichert und abrufbar gehalten werden wollen. Das Grid, das für das National Digital Mammography Archive aufgebaut wird, erzeugt einen riesigen »virtuellen Aktenschrank«, der diese Bilder unter geringem Qualitätsverlust komprimiert, speichert und wiedergibt. Darüber hinaus stellt das System Echtzeit-Verbindungen zu Experten und zu automatisierten Diagnosesystemen im ganzen Land bereit.

GEORGE RETSECK

Der Übergang wird alles andere als reibungslos vonstatten gehen. Aber ähnliche Übergänge haben wir in Gebieten wie der Fertigung oder der Stromerzeugung bereits hinter uns. Das Auto zum Beispiel war anfangs ein luxuriöses Spielzeug für Tüftler. Heute kann praktisch jeder Mensch in der entwickelten Welt eines benutzen, denn für Problemfälle steht ein riesiges globales Produktions- und Servicenetz bereit.

In einer vergleichbar organisierten Computerwirtschaft gäbe es Hersteller, Händler und Verbraucher. Erstere würden sich darauf konzentrieren, unter Nutzung der Vorteile der Massenfertigung immer bessere Geräte zu produzieren. Die Händler würden Angebot und Nachfrage zusammenbringen und neue Formen von wertschöpfenden Dienstleistungen finden. Die Verbraucher könnten sich einer reichhaltigen und rasch wachsenden Palette von Leistungen erfreuen, die von weit entfernten Netzbetreibern erbracht werden.

Bis diese Vision vom Rechnen übers Netz wahr wird, gibt es noch viel zu tun. Internet und World Wide Web ermöglichen es uns, von praktisch überall her Nachrichten zu versenden und auf Webseiten zuzugreifen; aber für eine gemeinschaftliche Nutzung von Ressourcen in großem Maßstab ist noch weit mehr Infrastruktur erforderlich. Wir sind in einer Situation, in der wir sprechen können, aber noch keine gemeinsame Sprache haben. Es ist noch zu vereinbaren, wie Dienstleistungen zu klassifizieren sind, wie die Partner einer Transaktion sich gegenseitig ihrer Identität vergewissern, wie Zugriffsrechte vergeben und überprüft werden und welche Aktivitäten zugelassen sind.

Die ersten Schritte zu einem solchen Regelwerk, der »Open Grid Services Architecture«, wurden im vergangenen Jahr unternommen. Damit würde die Technik des World Wide Web, die in einem internationalen Gremium ausgehandelt und von der Industrie voll akzeptiert wurde, mit den Techniken des Grid zusammengeführt, bei denen die wissenschaftliche Gemeinschaft Pionierarbeit geleistet hat.

Versetzen wir uns ein paar Jahre in die Zukunft. Die Open Grid Services Architecture ist voll etabliert, und ein Kunde bestellt über das Internet eine virtuelle Tauchtour vor Cozumel bei unserem Reiseveranstalter ScubaTours. Der vergewissert sich, dass der Kunde eine Breitbandverbindung hat, nimmt die Einzelheiten des Auftrags entgegen und reicht ihn an einen Dienstleister namens Computer Games Corp. weiter, der auf »virtual reality« spezialisiert ist. (Diese Firma beliefert auch die Veranstalter von Internet-Spielen, bei denen viele Spieler ihre virtuellen Stellvertreter in einer Kunstwelt agieren lassen können.) Die Rechner von Computer Games Corp. wiederum stellen die für den gewünschten »Durchflug« nötigen Daten und Programme zusammen, suchen im Grid nach dem günstigsten Lieferanten von Rechenzeit, laden dorthin die Software, und der virtuelle Tauchgang geht los – ein Strom von Daten für bunte Bilder, der in Abhängigkeit von den Steuerbefehlen des Kunden erzeugt wird. Computer Games Corp. ist also ein Zwischenhändler, der aus Waren von verschiedenen Herstellern ein Paket speziell für diesen Kunden schnürt.

Das Online-Geschäft der Zukunft

Von all diesen Verhandlungen zwischen ScubaTours, Computer Games Corp. und deren Lieferanten soll der Kunde nichts merken. Dieses reibungslose Funktionieren herzustellen ist alles andere als einfach. Die Programmierer bei Computer Games Corp. müssen schon spezialisierte Software geschrieben haben, die auf mehreren Rechnern zugleich läuft, und sie müssen wissen, wie man die benötigte Rechnerleistung und die Netzwerkkapazität abschätzt und ausfindig macht. Für Letzteres nehmen sie die Dienste eines vertrauenswürdigen »Maklers« in Anspruch. Wenn ihnen dieser Computer einen geeigneten Lieferanten genannt hat, sagen wir Computers Inc., nehmen sie direkt mit ihm in einer gemeinsamen Sprache Kontakt auf. Über ein sicheres Protokoll überzeugen beide Partner einander von ihrer Vertrauenswürdigkeit (»Ich bin kein Hacker«, »Ich kann bezahlen«, »Ich bin eine etablierte Firma«) und handeln die Geschäftsbedingungen aus: Anzahl der Rechner, Leistungsfähigkeit, Preise und so weiter.

Nachdem Computer Games Corp. die Software auf die Rechner von Computers Inc. geladen und gestartet hat, erscheinen die ersten Korallen und bunten Fische auf dem Bildschirm des Kunden. Aber damit ist der Auftrag noch nicht erledigt. Vielleicht bewegt sich der Kunde in eine unerwartete Richtung, was den Rechnerbedarf erhöht, oder es fallen ein paar Rechner oder Netzwerke aus. Daraufhin muss Computer Games Corp. zusätzliche Rechner einbeziehen oder notfalls die Genauigkeit der Simulation reduzieren.

Alle diese Interaktionen unter Computern – sich ausweisen, Leistungen anbieten, nachfragen, buchen, in Anspruch nehmen, abrechnen und bezahlen – sollten in einer Sprache stattfinden, die möglichst allen potenziell Beteiligten gemeinsam ist. Software für viele dieser Aufgaben ist bereits im Globus Toolkit enthalten; allgemeinere Standards werden von den Arbeitsgruppen des Global Grid Forum verbreitet.

Wie in anderen Industriebereichen auch wird diese Standardisierung Wettbewerb und Innovationen im Bereich der Rechnerdienstleistungen in Gang setzen. ▷

▷ So werden vielleicht Schreibtisch- oder Heimcomputer in hinreichender Menge als bedeutende Rechen- und Speicherressource nutzbar gemacht. Für den Sloan Digital Sky Survey hat ein System namens Condor Schreibtischcomputer gebündelt, die ungefähr die Hälfte der gesamten Rechenleistung beisteuerten. Inzwischen ist die dafür erforderliche Software das Geschäft von Firmen wie DataSynapse, Entropia, Platform und United Devices.

Wie sieht die Zukunft des Grid Computing aus? Wenn alle sich daran beteiligen, wird es ein großer Erfolg. Aber der erste, der in die Technik investiert, könnte auf seinen Kosten sitzenbleiben, wenn die anderen nicht mitziehen. Um dieses Hemmnis zu überwinden, muss der Einstieg möglichst einfach und preisgünstig sein. Insbesondere sind nicht nur die Bedingungen für die Teilnahme am Grid bis in die Einzelheiten offenzulegen, es muss auch einen allgemein verfügbaren Weg geben, sie zu erfüllen. Der Globus Toolkit stellt genau das bereit. Für den weiteren Fortschritt haben sowohl die akademische Welt als auch die Industrie und kommerzielle Dienstleister ihre Beiträge zu leisten. Etabliert ist das Grid erst, wenn die zugehörige Software in Standard-Betriebssysteme eingebaut und Gegenstand von Schulungsveranstaltungen für Anfänger ist.

Nachdem das Grid in den beschützenden Gehegen der wissenschaftlichen Welt oder firmeninterner Netze seine ersten Erfolge gezeigt hat, muss es sich nun in der rauen Geschäftswelt bewähren. Wird es noch funktionieren, wenn die Anzahl der Beteiligten um mehrere Zehnerpotenzen ansteigt? Wie kann es gegen den Ausfall einzelner Komponenten robust gemacht werden? Wie kann man den Benutzern die Vorteile jederzeit verfügbarer Rechenleistung nahebringen?

Ohne Zweifel werden die Ideen vom Welt-Computer, die David P. Anderson und John Kubiatowicz in dieser Zeitschrift (6/2002, S. 80) vorgestellt haben, in das Grid der Zukunft eingehen. In meinen Augen werden alle diese Konzepte auf etwas hinauslaufen, was der Benutzer nur diffus als Quelle von Rechenleistung wahrnimmt: Seine Daten kommen aus der Steckdose – um mehr muss er sich nicht kümmern. ◁

Ian Foster kommt ursprünglich aus Neuseeland. Er ist einer der Chefs der Mathematik- und Informatikabteilung am Argonne-Nationallaboratorium und Professor für Informatik an der Universität Chicago. Daneben berät er mehrere Firmen, darunter Entropia und Insors. Seine Pionierarbeit für das Grid wurde mit mehreren Auszeichnungen gewürdigt.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Tomorrow's computing today. Von Declan Butler in: Nature, Bd. 422, S. 799, 24. April 2003.

The Grid: A New Infrastructure for 21st Century Science. Von Ian Foster in: Physics Today, Bd. 55, Heft 2, S. 42, 2001.

The World-Wide Telescope. Von A. Szalay und J. Gray in: Science, Bd. 293, S. 2037, 2001.

Weblinks zu diesem Thema, insbesondere eine Liste aktueller Grid-Projekte, finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Grid Computing in Deutschland

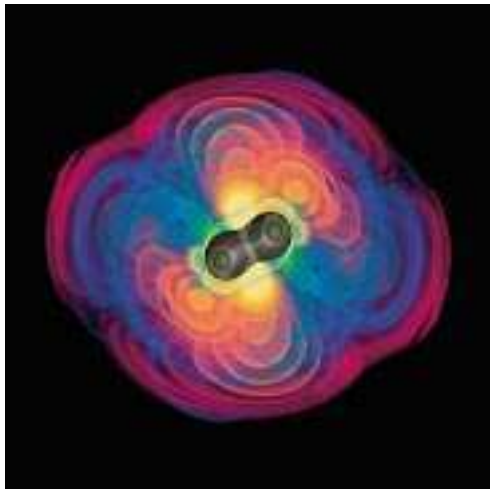
Eine nationale Anstrengung für eine neue Technologie bringt einen Wettbewerbsvorteil – auch wenn die Technologie ihrer Natur nach weltumspannend ist.

Von Alexander Reinefeld und Florian Schintke

Als sich im Juni 1999 mehr als hundert amerikanische Wissenschaftler im Ames-Forschungszentrum der Nasa zum ersten Grid Forum, dem Vorläufer des heutigen Global Grid Forum, trafen, hatte man auch in Deutschland bereits an Computerprogrammen gebastelt, die einen einfachen Zugriff auf ferne Rechner und Daten ermöglichen sollten. Die Systeme hießen damals noch Meta-Computer oder Hyper-Computer, hatten aber schon dieselben Grundkonzepte wie das heutige Grid Computing.

Eine wichtige Starthilfe boten die »Gigabit-Testbeds«: Seit 1998 wird das Datennetz DFN (Deutsches Forschungsnetz), das alle deutschen Universitäten und Forschungseinrichtungen verbindet, allmählich durch Glasfaser-Datenleitungen mit Übertragungsraten von mehreren Gigabit (Milliarden Bit) pro Sekunde ergänzt. Erst diese Verbindungen machten es möglich, rechenzeitaufwendige Computerprogramme gleichzeitig auf mehreren Supercomputern zum Beispiel in Berlin, Garching und München auszuführen und damit Probleme zu bearbeiten, die einen einzelnen Hochleistungsrechner überfordert hätten. Natürlich mussten dazu Anwendungsprogramme und Systemsoftware an die verteilten Umgebungen angepasst werden – eine Investition, die sich heute auszahlt.

Als eines der ersten größeren Grid-Projekte wurde Mitte der neunziger Jahre der Forschungsverbund NRW-Metacomputer aus der Taufe gehoben. Gefördert vom nordrhein-westfälischen Wissenschaftsministerium, sollte er die Computer des Bundeslandes über eine Verbindungssoftware gemeinsam nutzbar machen. Nur wenig später folgten die Verbundprojekte Unicore und Unicore-Plus des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), in denen unter Federführung des Forschungszent-



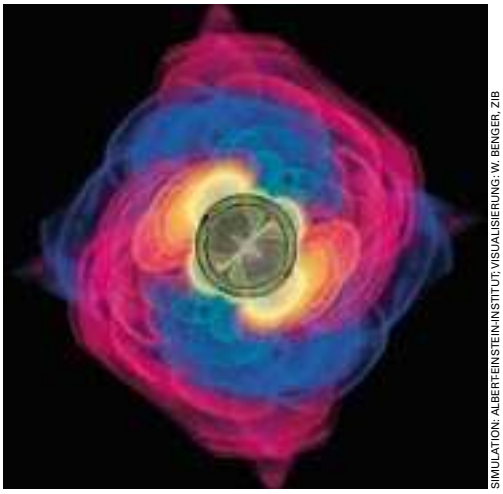
Zwei Schwarze Löcher kollidieren (nicht-zentral) und senden dabei Gravitationswellen aus. Erstmals wurden in dieser numerischen Simulation drei Viertel eines Umlaufs durchgerechnet.

rums Jülich zwischen 1997 und 2002 eine benutzerfreundliche Grid-Software entwickelt wurde. Ähnlich wie die amerikanische Software Globus bietet sie einen transparenten und sicheren Zugriff auf entfernte Computersysteme. Mit Hilfe von Unicore lassen sich für fachspezifische Benutzergruppen rasch Zugänge zum Grid erstellen, die dann jedes Mitglied der Gruppe auch ohne detaillierte Grid- oder Supercomputer-Kenntnisse nutzen kann. Unicore wird heute in den wichtigen deutschen Supercomputerzentren und in einigen anderen europäischen Zentren eingesetzt.

Auf europäischer Ebene wird die Entwicklung von Grid-Systemen besonders intensiv gefördert. Das fünfte Rahmenprogramm der Europäischen Union umfasst 24 Grid-Projekte mit einem Fördervolumen von etwa 58 Millionen Euro; deutsche Universitäten, Forschungseinrichtungen und die Industrie sind massiv daran beteiligt. Im gerade angelaufenen sechsten Rahmenprogramm stehen sogar 350 Millionen Euro für Grid-Projekte zur Verfügung.

Im Vergleich dazu nehmen sich die vom BMBF vorgesehenen Finanzmittel des aktuellen Förderprogramms IT 2006 eher bescheiden aus. Hoffnung macht jedoch die Tatsache, dass die Regierungsparteien in ihrer Koalitionsvereinbarung vom Oktober 2002 ausdrücklich die Bedeutung der Vernetzung von Computersystemen würdigen: »Wir werden die Vernetzung von Hochschulen, außeruniversitären Forschungseinrichtungen und Unternehmen verstärken und ihre Einbeziehung in den Aufbau von EU-weiten Exzellenzzentren unterstützen.«

Auch die Industrie interessiert sich zunehmend für das Grid Computing; schließlich lassen sich damit Kosten sparen und vorhandene Computer effizienter nutzen. Während große Firmen wie IBM, Hewlett Packard und Sun Microsystems auf Hochtouren das Potenzial dieser Technik für die industrielle Praxis ausloten und gemeinsam mit Universitäten und Forschungseinrichtungen erste Erfahrungen sammeln, haben mittelständische Unternehmen wie die Pallas GmbH bereits erste Grid-Softwarepakete in ihre Produktpalette aufgenommen. Einige Fraunhofer-Institute präsentierten der Industrie auf der diesjährigen CeBIT in Hannover eine Grid-Infrastruktur, die freie Kapazitäten gewöhnlicher PCs für Berechnungen nutzbar macht.



SIMULATION: ALBERT-EINSTEIN-INSTITUT; VISUALISIERUNG: W. BENGER, ZIB

Billiarden von Bytes pro Jahr

Als Ressourcen-Zentrum für die Hochenergiephysik wurde im Herbst 2002 das Grid Computing Centre Karlsruhe (GridKa) eingeweiht. Hauptaufgabe ist die Bereitstellung von Rechenleistung und Speicherkapazität für die deutschen Physiker, die an der Analyse der Cern-Experimente beteiligt sind. Man erwartet ein Datenvolumen von mehreren Petabyte pro Jahr (ein Petabyte sind 10^{15} Byte, was dem Inhalt von 1,7 Millionen CDs entspricht). Die erforderliche Software wird derzeit im EU-Forschungsprojekt DataGrid entwickelt; aus Deutschland sind die Universität Heidelberg und das Zuse-Institut Berlin (ZIB) beteiligt.

Interessant ist es, zu dem neuen Werkzeug auch neuartige Anwendungen zu entwickeln, die es effektiv nutzen können. Am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) in Potsdam haben Forscher ein Programm namens Cactus geschrieben, das die Kollision zweier Schwarzer Löcher im Weltraum simuliert (Bild links) und mit dem Grid umzugehen weiß. Cactus überwacht die Leistung der Computer, auf denen es gerade läuft. Sind diese zu schwach, hält das Programm im Grid Ausschau nach leistungsfähigeren Computern und verlagert sich dann selbständig dorthin, ohne dass der Nutzer dies bemerkt. Für die Fortentwicklung dieses Programms wurde den Potsdamer Wissenschaftlern 2002 der Gordon-Bell-Preis verliehen.

Auch am ZIB, das im Hochleistungsrechnerverbund Nord (HLRN) leistungsfähige Supercomputer betreibt, wird in verschiedenen Industrie- und EU-Projekten an der nächsten Generation von Grid-Systemen gearbeitet. Neben der allgemeinen Qualitätsverbesserung geht es besonders um die selektive Bildübertragung über große Entfernungen bei geringer Bandbreite und den effizienten Umgang mit riesigen Datenmengen. Forscher des ZIB zählten zu den Initiatoren des europäischen EGrid Forum, das 2001 mit dem amerikanischen Grid Forum zum heutigen Global Grid Forum (GGF) vereinigt wurde.

Der problemlose Zugriff auf Computer- und Daten-Ressourcen, wie ihn das Grid Computing bereitstellt, bildet den Nährboden für eine effektive, international konkurrenzfähige Forschung und liegt daher, bei aller Internationalität der Wissenschaft, auch im nationalen Interesse. Aus diesem Grunde haben die Wissenschaftler in Deutschland die Initiative zur Gründung eines nationalen D-Grid ergriffen, das die deutschen Grid-Aktivitäten bündeln und sich international an der strategischen Weiterentwicklung des Grid Computing beteiligen soll. Dies geht allerdings nicht ohne die Hilfe nationaler Förderer. Die Regierungen in England, Italien und den Niederlanden sind bereits mit gutem Beispiel vorangegangen und haben zwei- oder sogar dreistellige Millionenbeträge zum Aufbau nationaler Grids bereitgestellt. Die bahnbrechende Erfindung des WWW am Cern vor zehn Jahren hat gezeigt, dass es in Europa nicht an schlauen Köpfen mangelt, sondern an der mutigen und konsequenten Förderung, Umsetzung und Weiterentwicklung ihrer Ideen! ◁

Alexander Reinefeld ist Direktor des Bereichs Computer Science am Zuse-Institut Berlin (ZIB) und Professor am Institut für Informatik der Humboldt-Universität zu Berlin. Mit seiner Arbeitsgruppe ist er an mehreren Forschungsprojekten über Grid- und Cluster-Computing beteiligt.

Florian Schintke ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am ZIB. Er leitet unter anderem die von ihm mit initiierten EU-Projekte DataGrid, GridLab und FlowGrid.

AUTOREN UND LITERATURHINWEIS

Vom World Wide Web zum World Wide Grid. Eine neue Informations-Infrastruktur für wissenschaftliche Anwendungen. Von H. F. Hoffmann, A. Putzer und A. Reinefeld in: Physikalische Blätter, Bd. 57, Nr. 12, S. 39, 2001. Auch als Report ZR-02-39, Zuse Institut Berlin, www.zib.de, Dez. 2002.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

INTERVIEW

»Der Earth Simulator hat uns aufgeweckt«

Der Chef des kalifornischen Hochleistungs-Rechenzentrums NERSC äußert sich zu der Herausforderung durch den jüngsten japanischen Supercomputer.

Spektrum der Wissenschaft: Im April 2002 wurde in Japan der »Earth Simulator« in Betrieb genommen, der den bis dahin schnellsten Rechner der Welt, »ASCI White«, um das Fünffache an Geschwindigkeit übertraf (Spektrum der Wissenschaft 9/2002, S. 14). Damals hieß es, über die Amerikaner sei ein »Computenik-Schock« gekommen, vergleichbar dem Sputnik-Schock von 1957. Hat der Earth Simulator die Fachleute so überrascht?

Horst Simon: Der Rechner selbst nicht. Die japanischen Kollegen hatten schon vor zwei Jahren, noch vor der offiziellen Ankündigung, mit uns über das Projekt gesprochen. Aber dass die Herstellerfirma NEC den Earth Simulator pünktlich zum Liefertermin nicht nur aufgestellt hatte, sondern er auch funktionierte, das war eine große Überraschung.

Man muss dazu wissen, dass sich unter den amerikanischen Herstellern eine »Kultur der Verspätung« etabliert hat: Größere Innovationen kommen regelmäßig drei bis sechs Monate nach dem angekündigten Termin. Von der für 2002 angekündigten amerikanischen Spitzenmaschine, »ASCI-Q«, die mit 30 Teraflops Spitzenleistung in Los Alamos arbeiten sollte, sind bis heute nur zwei 10-Teraflops-Rechner in Betrieb.

Die zweite Überraschung: Nach unseren Gesprächen hatte ich erwartet, dass der Earth Simulator auf eine Dauerleistung von vielleicht zehn Teraflops kommen würde. Tatsächlich hat er, mit einer Anwendung aus der Klimaforschung, 27 von 40 möglichen Teraflops erreicht. Das ist sowohl absolut als auch im Wirkungsgrad eine überragende Leistung; sie wurde im letzten Herbst mit dem Gordon-Bell-Preis ausgezeichnet.

Spektrum: Das Konstruktionsprinzip für die Einzelrechner des Earth Simulator, der Vektorrechner, gilt außerhalb Japans weitgehend als überholt. Ist der Earth Simulator so erfolgreich, weil oder obwohl er aus Vektorrechnern besteht?

Simon: Weder noch. Für den Erfolg entscheidend ist die große Bandbreite zwischen Speicher und Prozessor [siehe Glossar]. Gerade für Klimasimulationen ist es typisch, dass der Prozessor eine Zahl aus dem Speicher holt, mit ihr eine einzige Multiplikation durchführt und das Ergebnis gleich wieder abspeichert. Wenn das Verhältnis von Rechenoperationen zu Speicherzugriffen, wie in diesem Fall, in die Nähe von 1 gerät, muss die Architektur sehr gut ausgewogen sein, damit die Maschine auf einen guten Wirkungsgrad kommt.

Spektrum: Gibt es eine Hauptursache für den Erfolg?

Simon: Die Bereitschaft, viel Geld aufzuwenden! Bandbreite für Speicherzugriff ist einfach sehr teuer. Aber wenn in den USA die Regierung bereit ist, ebenfalls 400 Millionen Dollar für einen Superrechner zu bezahlen, dann können wir das auch. Die »Cray X-1« hat eine sehr gute Bandbreite, kostet aber auch entsprechend.

Horst Simon hat an der Technischen Universität Berlin 1978 das Diplom in Mathematik abgelegt und 1982 an der Universität von Kalifornien in Berkeley promoviert. Seit 1996 ist er Direktor des National Energy Research Scientific Computing Center (NERSC), das zum Lawrence-Berkeley-Nationallaboratorium in Berkeley (Kalifornien) gehört. Als überregionales Hochleistungsrechenzentrum ist das NERSC deutschen Zentren wie dem Konrad-Zuse-Institut in Berlin oder dem John-von-Neumann-Institut für Computing in Jülich vergleichbar.

Spektrum: Lohnt das den Aufwand?

Simon: Nicht unter allen Umständen. Es macht keinen Sinn, für eine Verdopplung des Wirkungsgrades den fünffachen Preis zu bezahlen. Andererseits ist der Wirkungsgrad eine sehr schlecht bestimmte Größe, weil er stark von der Art der Anwendung abhängt. Es gibt Programme, die laufen auf einer »SX-6« – dem Grundbaustein des Earth Simulator – mit 60 Prozent und nur mit fünf bis zehn Prozent auf einer »Power 3« oder »Power 4« von IBM. Bei anderen Programmen ist es genau umgekehrt.

Spektrum: Was kommt nach ASCI-Q?

Simon: Die Kollegen vom Lawrence-Livermore-Nationallaboratorium haben schon »ASCI Purple« angekündigt. Es wird sich um eine IBM-Maschine handeln, die das Stadium Power 4 überspringt und gleich mit Power-5-Prozessoren ausgestattet sein wird. Die Auslieferung ist für Ende 2004 geplant, die genaue Leistung steht noch nicht fest. Unter Vorbehalt sind 100 Teraflops angekündigt.

Spektrum: Gibt es andere Neuentwicklungen in den USA?

Simon: Ja. Wir kommen allmählich von einer strikten Entweder-Oder-Haltung ab, die etwa besagt: Entweder besteht ein Superrechner ganz aus relativ billigen Prozessoren aus der Massenfertigung, und man gleicht ihre mangelhafte Eignung durch große Anzahlen aus – das sind die Clusters und die meisten Geräte, die IBM anbietet; oder sämtliche Teile des Rechners werden für diesen Zweck neu entworfen – Beispiel Cray X-1 –, was wegen der geringen Stückzahl die einzelne Maschine jedoch sehr teuer macht. Inzwischen sind sehr interessante Mischungen dieser Extreme in der Planung.

Das Projekt »Red Storm« ist eine solche Mischung aus 80 Prozent Standardware und entscheidenden 20 Prozent Spezialentwicklung. Die Sandia Laboratories in Albuquerque (New

Mexico) haben die Architektur dieses Rechners selbst konzipiert und die Herstellung bei Cray in Auftrag gegeben.

Das Projekt »Blue Planet«, das wir bei NERSC in Zusammenarbeit mit IBM entwickelt haben, wird eine ähnliche Mischung realisieren. IBM hatte schon entschieden, wie ihre kommerziellen Maschinen 2005/2006 aussehen sollen, und wir haben Veränderungen vorgeschlagen, welche die Leistung für wissenschaftliche Zwecke erheblich erhöhen würden.

Spektrum: Wird denn »Blue Planet« an Ihrem Zentrum stehen?

Simon: Das hängt von den Haushaltmitteln ab. Wir sind sehr überzeugt von unserem Projekt und würden sogar die Prognose wagen, dass das Gerät die doppelte Leistung des Earth Simulator zum halben Preis bietet. Aber das wären immer noch 200 Millionen Dollar. Für ein ziviles Zentrum mit Grundlagenforschung wie unseres galt bisher eher ein Zehntel dieses Betrages als angemessen.

Beide Häuser des Kongresses sind der Wissenschaft im Allgemeinen und der Grundlagenforschung im Besonderen sehr wohlgesonnen. Man versteht mittlerweile, dass nicht nur Biologie und Medizin, sondern auch Physik, Mathematik und Informatik sehr wichtig sind. Andererseits hat die Regierung Steuersenkungen versprochen, und der Irak-Krieg wird den Staatshaushalt sehr belasten.

Spektrum: Also gibt es keine Antwort der USA auf den Earth Simulator?

Simon: Nicht in diesem und nicht im nächsten Jahr. Im Haushaltsentwurf für 2004 ist keine nennenswerte Ausgabensteigerung für Hochleistungsrechner vorgesehen. Immerhin hat der Earth Simulator die Wissenschaftler und Politiker aufgeweckt.

Spektrum: Was bedeutet das?

Simon: Vor etwa zehn Jahren war die japanische Computerindustrie noch weit bedeutender als heute. Es gab kleinere Hersteller von Höchstleistungsrechnern in Großbritannien und in Deutschland. Um diese Zeit wurde die Initiative HPCC (*high performance computing and communications*) gestartet, mit dem Ergebnis, dass die Dominanz der USA in Hardware wie in Software sehr stark ausgebaut wurde.

Seit etwa sechs Jahren hat diese Initiative keinen neuen Anschub mehr enthalten. Ein Petaflops-Workshop führte zu nichts, weil es keine neuen Fördermittel gab. Aus diesem Dämmerschlaf sind wir aufgeweckt worden. Es gibt wieder gemeinsame Ausschüsse (*task forces*) der verschiedenen Wissenschaftsförderungsagenturen. Die National Academy of Sciences hat eine Studie über die Zukunft des Hochleistungsrechnens in Auftrag gegeben. Es gärt so wie seit acht Jahren nicht mehr.

Spektrum: In der Liste der 500 stärksten Rechner finden sich immer mehr Cluster, also »Haufen« gewöhnlicher PCs, die über Datenleitungen verbunden sind und sich eine große Rechenarbeit teilen. Wie kommt es, dass ausgerechnet der Pionier Thomas Sterling sein eigenes Kind, den Beowulf-Cluster (Spektrum der Wissenschaft 3/2002, S. 88), für tot erklärt?

Simon: Cluster sind nicht wirklich tot. Sie sind geeignet für den Rechenbedarf einer einzelnen Abteilung mit hundert Leuten in der Industrie, oder für einen Universitäts-Fachbereich. Wir haben im Forschungszentrum zehn bis fünfzehn PC-Cluster aus 32 bis 512 Prozessoren. Die sind sehr nützlich, zum Üben für die Wissenschaftler, bevor sie auf das große Gerät gehen.

Thomas Sterling hat zwei Kinder. Der PC-Cluster Beowulf ist das eine. Das andere ist HTMT (*hybrid technology multithreaded system*, Spektrum der Wissenschaft 1/2002, S. 78), und das war das einzige ernst zu nehmende Bauprinzip, das vor 2008 eine Leistung im Petaflops-Bereich hätte erbringen können. Ein solches Ziel mit PC-Clustern anzustreben ist aussichtslos oder zumindest vom Aufwand her ziemlich abwegig. Das hat Thomas Sterling gemeint, als er im letzten Jahr in Baltimore Beowulf für tot erklärte.

Spektrum: Kann das Grid den Rechenbedarf der Kunden Ihres Zentrums befriedigen?

Simon: PC-Cluster und Grid Computing werden häufig in einem Atemzug genannt, sind aber grundsätzlich verschiedene Dinge. Das Grid wird ja gerne mit dem Stromnetz verglichen. Und zu den Leuten, die glauben, das Grid würde das Hochleistungsrechnen überflüssig machen, kommt mir der alte Spottspruch der Atomindustrie in den Sinn: »Wozu Kraftwerke? Bei uns kommt der Strom aus der Steckdose.« Supercomputer sind so etwas wie die Kraftwerke für das Grid.

Spektrum: Und dass der kleine PC-Benutzer seine Rechenleistung mit ins Grid einspeist?

Simon: Das mag für manche Anwendungen nützlich sein; für echtes Hochleistungsrechnen ist es uninteressant. ◁

GLOSSAR

▶ Die **Leistung eines Supercomputers** wird in »Flops« (*floating point operations per second*, Gleitkomma-Rechenakte pro Sekunde) gemessen. Der zurzeit schnellste Rechner der Welt, der **Earth Simulator**, hat eine theoretische Spitzenleistung *(peak performance)* von 40 Teraflops (Billionen Flops); diese würde erreicht, wenn alle in ihm enthaltenen Einzelrechner (Prozessoren) gleichzeitig aktiv wären. Das ist jedoch praktisch nie der Fall, weil die Prozessoren häufig auf Daten warten müssen. Den Anwender interessiert weit mehr die bei der Ausführung seines Programms erbrachte **Dauerleistung** *(sustained performance)*.

▶ Ein **Petaflops** sind 1000 Teraflops oder 10^{15} Flops.

▶ Eine Messgröße für die Effizienz eines Superrechners – unabhängig von dessen schierer Größe – ist der **Wirkungsgrad**, das Verhältnis von Dauer- zu Spitzenleistung *(sustained to peak performance ratio)*.

▶ **Bandbreite** (genauer: *processor to memory bandwidth*) ist »die Breite des Kanals, auf dem die Daten vom Arbeitsspeicher zum Rechenwerk schwimmen«, das heißt die Anzahl an Dateneinheiten, die pro Sekunde übermittelt werden können.

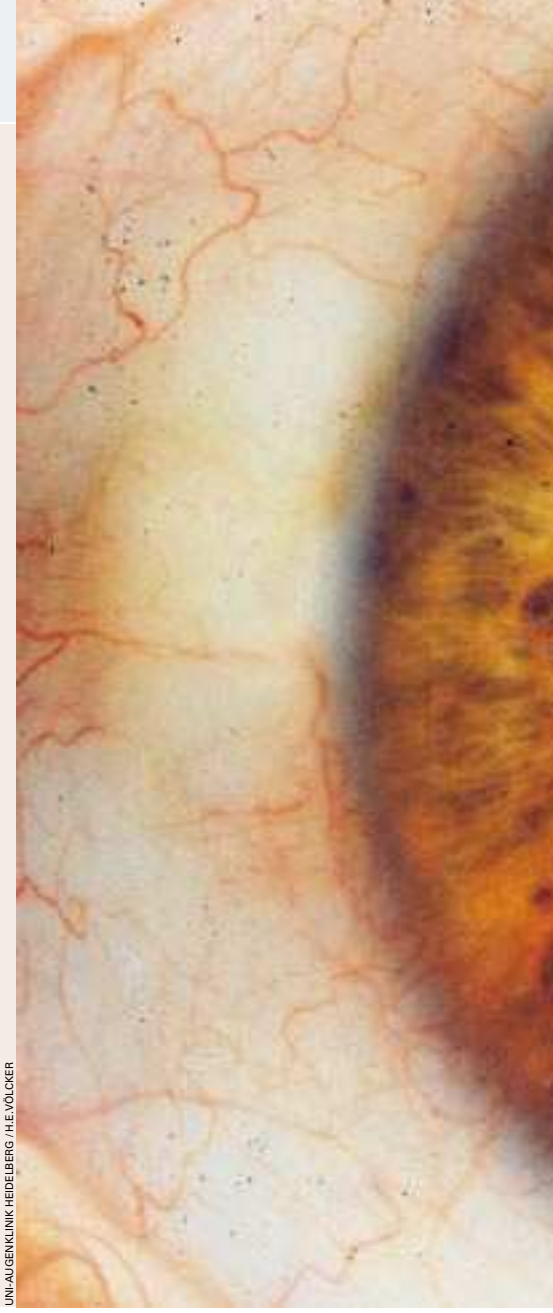
▶ **Power 3** und **Power 4** heißen die Prozessoren, die IBM gegenwärtig in ihre Superrechner einbaut. Power 3 wird seit 2000 ausgeliefert, Power 4 seit 2002.

Das Interview führte **Christoph Pöppe**, Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

REPORT

Biometrie

Was Unternehmen längst recht ist, soll dem Verbraucher bald billig sein: Fingerabdruck, Irisstruktur und andere unverwechselbare Merkmale einer Person sollen künftig Kennwörter und Geheimzahlen ergänzen oder sogar ersetzen. Im 2. Teil (August-Heft) berichten wir über Stimm-, Handschrift-, und Gesichtserkennung.



UNI-AUGENKLINIK HEIDELBERG / H.E. VÖLCKER

FINGERABDRUCK

Der vermessene Mensch

Biometrische Systeme wie zum Beispiel Fingerabdruckscanner sollen den Zugang zu Räumen und Daten kontrollieren. Doch die Sicherheit wird nicht nur von der Technologie bestimmt.

Von Uwe Schnabel

Für Hollywood gehören biometrische Systeme schon seit langem zum Alltag seiner Helden: 1983 gelang es einer Verbrecherorganisation im James-Bond-Film »Sag niemals nie«, einen Irisscanner auszutricksen und sich so in den Besitz von Atomsprengköpfen zu bringen. 1997 täuschte die Hauptperson in »Gattaca« eine andere Identität vor, unter anderem durch eine Folie mit einem fremden Fingerabdruck. Tatsächlich erschließen biometrische Systeme langsam den Markt der Sicherheitstechnik bis hin zur privaten Anwendung. Doch die Entwickler kämpfen nicht nur mit technischen Details, sondern auch mit zu hohen Erwartungen der potenziellen Kunden. Wenn dann Computerzeitschriften zum Beispiel berichten, dass preiswerte Zusatzgeräte für den Heim-PC mit geringem Aufwand zu überlisten sind, ist die Aufregung groß.

Biometrie soll technische Systeme durch Zugangskontrollen verbessern, seien es gefährdete Bereiche von Flughäfen oder Bankautomaten. Dazu messen Sensoren ein körperliches Merkmal und reichen die Messgröße in digitaler Form an eine Verarbeitungseinheit weiter. Meist enthalten die Messdaten sehr viel redundante Information, die von den spezifischen Daten getrennt werden muss. Diese Merkmalsextraktion ist der komplizierteste Teil biometrischer Systeme. In Muster erkennenden Algorithmen, ihrer Effizienz und Trennschärfe steckt das Knowhow der jeweiligen Anbieterfirma.

Um eine Person zu erkennen, die Zugang zu einem kritischen Bereich oder einem Gerät haben darf, müssen ihre Merkmale in einem als »Enrolment« be-

zeichneten Vorgang vorab erfasst und als Schablone (fachlich Template) in einer Datenbank gespeichert werden. Als »Matching« bezeichnen Experten den Vergleich aktueller Sensordaten mit diesen Schablonen im Routinebetrieb. Dabei lassen sich zwei Varianten unterscheiden: Gibt sich der mit dem Sensor Hantierende als eine bestimmte Person aus, vergleicht das Biometrie-System ihre aktuellen Merkmale mit dem entsprechenden Template. Damit prüft es die Authentizität des Benutzers; man spricht von Verifikation. Gibt es keine derartigen Angaben vorab, muss das System die aktuellen Merkmale mit allen gespeicherten abgleichen und die Person, sofern möglich, identifizieren.

Der italienische Anatom Marcello Malpighi (1628–1694) beschrieb als Erster die eigentümlichen Furchenmuster der Haut an den Fingerspitzen, doch erst der britische Regierungsbeamte William Herschel (1833–1918) versuchte 1878, Personen anhand ihres Fingerabdrucks zu identifizieren. Dieses Verfahren sollte helfen, beispielsweise Verträge fälschungssicher zu unterzeichnen. Sir Edward Henry (1859–1931) ließ während seiner Zeit als Polizeichef in der britischen Provinz Bengalen (Indien) ein Klassifikationssystem entwickeln und erfolgreich einsetzen. Zurück in England übernahm er 1901 die Leitung einer neuen Abteilung von Scotland Yard. Sie sollte die Fingerabdrücke von allen Insassen britischer Gefängnisse erheben. Schon 1902 ▷

IN KÜRZE

- Der Begriff **Biometrie** leitet sich vom griechischen *bios* für »Leben« und *metron* für »Maß« ab. In einem allgemeinen Sinne bezeichnet es jegliche Anwendung mathematisch-statistischer Methoden auf lebende Organismen. Die Informationstechnologie versteht darunter das Erkennen von Benutzern zu schützender Systeme aufgrund persönlicher Merkmale.
- Körperliche beziehungsweise **passive Merkmale** wie Fingerabdruck oder Handgeometrie bleiben ein Leben lang nahezu konstant.
- Verhaltenstypische beziehungsweise **aktive Merkmale** wie Sprache oder Schrift hingegen können sich ändern.

▷ gelang es der Behörde, einen Einbrecher anhand eines Fingerabdrucks zu überführen, den er auf dem Anstrich eines Hauses hinterlassen hatte. Heute ist dieses Verfahren aus der Kriminalistik nicht mehr wegzudenken.

Es lag also nahe, das Erkennen des Fingerabdrucks zu automatisieren und für technische Prozesse zu nutzen. Einige Sensoren messen Temperaturunterschiede zwischen ihrer Oberfläche und der Haut. Kapazitive Messfühler bestimmen den Unterschied der Dielektrizitätskonstanten von Haut und Luft. Der ist bei trockener Haut deutlich geringer als bei feuchter, der Kontrast des aufgenommenen »Bildes« ist entsprechend geringer. Optische Sensoren, die wie eine Kamera arbeiten, unterliegen deutlich weniger Einflüssen der Umgebung wie der Luftfeuchte und sind deshalb für den Außeneinsatz besser geeignet.

Topografie eines Fingerabdrucks

Mit welcher Methode auch immer ein Bild des Fingerabdrucks ermittelt wird: Es besteht aus einer Matrix von mehr als 200 Punkten (Pixeln) pro Zeile und mehr als 250 Zeilen. Jedem Pixel ist ein Grauton zugeordnet, der auf einer Skala zwischen schwarz und weiß 256 Werte annehmen kann. Ein solcher Wert lässt sich in einem Datenwort von acht Bit Länge digital speichern. Berücksichtigt man die typischen Abmessungen eines solchen Sensors, ergibt sich eine Auflösung von mindestens 300, besser 500 Pixeln pro inch (*dots per inch*, dpi); ein inch entspricht 2,54 Zentimetern.

Das Muster eines Fingerabdrucks besteht aus Furchen beziehungsweise den lang gezogenen Rücken, im Englischen als *ridges* bezeichnet. Sie bilden sich vor der Geburt, im vierten Monat der Schwangerschaft. Dabei haben nicht nur Erbanlagen Einfluss auf die individuelle Ausprägung, sondern auch das Hormonmilieu direkt beim Fötus. Deshalb lassen sich sogar eineiige Zwillinge anhand ihrer Fingerabdrücke auseinander halten.

ALLE BILDER DIESER DOPPELSEITE: OMNIKEY

Fingerabdruckscanner messen Temperatur- oder Kapazitätsunterschiede von Haut und Sensorfläche. Das so aufgenommene »Bild« wird vorverarbeitet, um die Informationen zu verdichten und den Kontrast zu erhöhen.

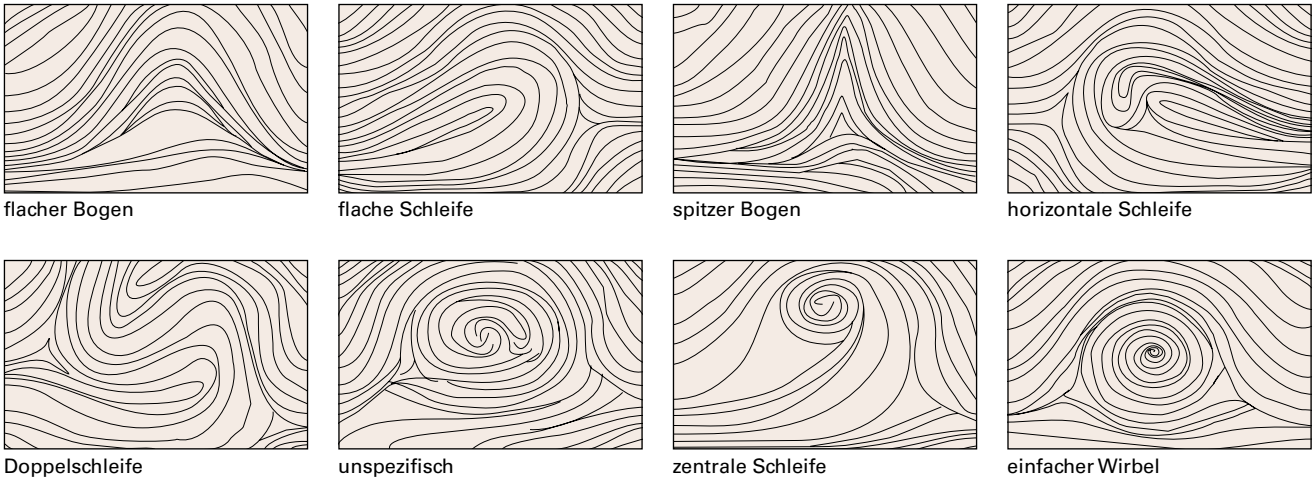
Fingerabdruckmuster werden zunächst in Klassen unterteilt (siehe Bild unten). Musterbasierte Erkennungsverfahren gliedern einen Abdruck dann in Zellen und bestimmen beispielsweise Winkel und Länge der *ridges* innerhalb solcher Bereiche, um dann die Klassifizierung vorzunehmen. Diese Verfahren sind sehr treffsicher beim Vergleich eines Fingerabdrucks mit den in einer Datenbank hinterlegten Templates, benötigen dafür aber einen hohen Rechenaufwand.

Sehr häufig werden deshalb so genannte Minuzien (lateinisch für »kleines Detail«) herangezogen. Das sind Diskontinuitäten der *ridges*, die etwa als Verzweigung ausgebildet sein können oder umgekehrt als Verschmelzung zweier Rücken zu einem (siehe Bild rechts oben).

Um diese Merkmale aus den Sensordaten zu extrahieren, müssen Algorithmen der Minuzienerkennung die Linien des Fingerabdrucks ausmachen. Dazu reduzieren Schwellenwertfilter zunächst die Graustufenmatrix auf ein Schwarz-Weiß-Bild, wobei spezielle Glättungsverfahren die Durchgängigkeit von Linien gewährleisten. Danach verfolgen Algorithmen entweder den Verlauf der Täler oder der Hügel – unterstützt durch ein Orientierungsfeld hangeln sie sich von einem Pixel zum nächsten. Eine Minuzie lässt sich dann grob durch ihren Typ, ihre X- und Y-Koordinate im Bild sowie ihre Orientierung kennzeichnen. Werden nur sie berücksichtigt, reduziert das den Rechenaufwand und der Datensatz der individuellen Schablonen ist kleiner. Für Verifikationen sind solche Verfahren sehr gut geeignet. Weitere Merkmale wie auffällige Poren können das Ergebnis beim Matching überdies verbessern.

Der Begriff »Trennschärfe« bezeichnet die Fähigkeit biometrischer Algorithmen, beim Vergleich mehrerer Fingerab-

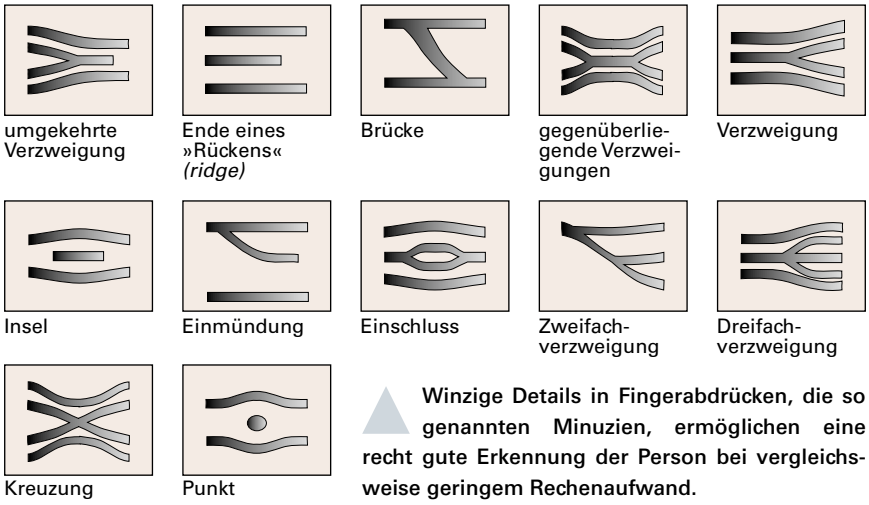
Verschiedene Grundmuster erlauben eine Klassifikation der individuellen Abdrücke. Entsprechende Algorithmen erfordern aber viel Rechenzeit.



drücke einer einzigen Person – zum Beispiel beim mehrmaligen Auflegen des gleichen Fingers auf den Sensor – möglichst häufig ein positives und beim Vergleich von Templates unterschiedlicher Herkunft möglichst ein negatives Ausgangssignal zu erzeugen (das Gleiche gilt natürlich auch für jedes andere Merkmal). Um diese Fertigkeit zu quantifizieren, werden zwei Arten von möglichen Fehlern angegeben. Die False Acceptance Rate (FAR) nennt die statistische Wahrscheinlichkeit eines Systems, beim Matching ein O.K. zu geben, obwohl die Templates von verschiedenen Personen stammen. Umgekehrt zeigt die False Rejection Rate, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Mensch vom System abgelehnt wird, obwohl sein Datensatz vorliegt.

Beide Fehlerraten sind von den verwendeten Algorithmen abhängig und stehen so in Relation zueinander. Da es sich um statistisch ermittelte Kurven handelt, lässt sich niemals sagen, ob eine bestimmte Person fälschlicherweise vom System zugelassen oder abgelehnt wird. Um ein System prüfen oder mit anderen vergleichen zu können, muss deshalb eine bekannte Datenbasis mit Rohbildern herangezogen werden. Die Erfahrung hat gezeigt, dass verschiedene solcher Kollektionen sehr unterschiedliche Fehlerraten hervorbringen können. Ein bestimmtes Produkt zur Erkennung von Fingerabdrücken ist umso besser, je zuverlässiger es sowohl mit überwiegend europäischen als auch asiatischen Benutzern funktioniert. Zudem beeinflussen, wie schon erwähnt, Umgebungsbedingungen wie Temperatur und Luftfeuchte und freilich auch der Zustand des jeweiligen Fingers den Prozess: Ist er trocken oder feucht, sauber oder schmutzig? Die Definition objektiver Kriterien für den Vergleich biometrischer Geräte ist zurzeit Gegenstand intensiver internationaler Expertengespräche.

Die Anwender können aber viel dafür tun, die Fehlerraten drastisch zu reduzieren. Insbesondere sollte die beim Enrolment erzeugte Schablone von sehr hoher Qualität sein. In der Praxis bedeutet das: Ungeübte Benutzer sollten den Umgang mit einem biometrischen System zunächst üben und das Enrolment selbst muss durch geschultes Personal überwacht und angeleitet werden. Weitere wesentliche Verbesserungen werden erzielt, wenn die Benutzer das biometrische Gerät bewusst sorgsam nutzen: Wer seinen Finger aus Gedankenlosigkeit nicht ganz auf den Sensor legt, enthält dem Gerät einen Teil der Körpermerkmale vor.



Winzige Details in Fingerabdrücken, die so genannten Minuzien, ermöglichen eine recht gute Erkennung der Person bei vergleichsweise geringem Rechenaufwand.

Welchen Vorteil die Biometrie, ob Fingerabdruck- oder Handschrifterkennung, für ein Unternehmen bietet, hängt aber nicht allein vom jeweiligen System ab, sondern auch von einer sachgerechten Planung vorab. Im Allgemeinen erwarten die Kunden ein Mehr an Sicherheit ihrer technischen Systeme, doch diese abstrakte Größe muss vor dem Design eines biometrischen Systems konkretisiert werden, zum Beispiel durch das Entwickeln realistischer Angriffsszenarios auf den zu schützenden Bereich.

Statik verrät den Angreifer

Soll es nicht möglich sein, einen Fingerabdrucksensor mit einer Silikonattrappe zu täuschen – die allerdings gar nicht so leicht herzustellen ist, man bedenke beispielsweise die gewölbte Form von Oberflächen wie einem Trinkglas, die als Quelle eines Abdrucks in Frage kämen –, hier mag ein ergänzender »Lifescan« sinnvoll sein. Dann müssen weitere Messgrößen wie zum Beispiel die Temperatur des Fingers erfasst werden, um die Lebendigkeit des Benutzers festzustellen. Eine andere Möglichkeit ist es, mehrere Aufnahmen in kurzer Zeit zu machen und sie zu vergleichen: Stimmen sie exakt überein, spricht das gegen ein lebendes Wesen. Doch letztlich werden auch dagegen Maßnahmen entwickelt werden, denn mit immer höherem Aufwand lässt sich wohl so ziemlich jedes System, auch ein biometrisches, überlisten.

Wie hoch auch immer der Sicherheitsanspruch ist, es sollte nicht vergessen werden, mit welchen Mitteln er derzeit realisiert wird. Die weit verbreiteten PINs und Passwörter, die über die Tastatur des PCs eingegeben werden, können durch »Trojanische Pferde« aus dem Internet ausgespäht werden. Zur Überwindung eines Fingerabdrucksensors sind immerhin ein Originalabdruck, das Anfertigen einer Attrappe und der physische Zugang zum Sensor erforderlich. Biometrie kann bereits heute die sicherheitskritischen Ressourcen sehr wirksam vor automatisierten Angriffe schützen! Dass es noch einen erheblichen Bedarf an Verbesserungen gibt, ist unbestritten, Dies ist aber kein Grund, auf deren praktischen Einsatz zu verzichten. Auch auf Türschlösser wird niemand verzichten, obwohl sie von Einbrechern meist leicht zu knacken sind.

Um weite Verbreitung zu finden, muss diese Technik leicht integrierbar und in Einzelkomponenten auch leicht austauschbar sein. Das allerdings setzt international anerkannte Standards etwa für Schnittstellen und Datenformate voraus, wie sie gegenwärtig in verschiedenen Gremien entwickelt werden. Ein wesentlicher Faktor für die Durchsetzung auf dem Markt lässt sich freilich nicht standardisieren, allerdings durch gute Standards fördern: Die Akzeptanz der potenziellen Benutzer. Wer ein Zugangssystem installiert, das unergonomisch und schwer durchschaubar ist, dürfte an der Biometrie nicht viel Freude haben. ◁

Der Nachrichtentechniker **Uwe Schnabel** ist Vorstandsmitglied der Omnikey AG mit Sitz in Wiesbaden, dem weltweit drittgrößten Anbieter von Chipkartenlesern. Die Produkte sind zum Teil mit integrierter Fingerabdruckerkennung ausgestattet.

VERBRAUCHERSCHUTZ

Vom Datensatz zur Unperson

Stimmerkennung und Co. bieten den Verbrauchern mehr Schutz als eine Geheimzahl, doch es drohen auch neuartige Gefahren.

Von Michael Bobrowski

Dass die PIN genannte Geheimzahl das Konto nicht vollständig gegen kriminellen Missbrauch schützt, hat schon mancher Konsument leidvoll erfahren müssen: Laut der letzten Statistik des Bundeskriminalamtes wurden im Jahr 2001 insgesamt 48 610 Betrugsfälle mit rechtswidrig erlangten Karten für Geldausgabe- beziehungsweise Kassenautomaten erfasst. Das waren 9,8 Prozent mehr als im Jahr davor (hinzu kamen 57 713 Betrügereien mit Kreditkarten, die allerdings häufig nicht durch eine PIN geschützt sind).

Fällt eine Bankkarte Dieben in die Hände, bleibt oft nicht viel Zeit, sie sperren zu lassen. Abgesehen von dem leider nicht seltenen Fall, dass die »persönliche Identifikationsnummer« in der gestohlenen Brieftasche auf einem Zettel hinterlegt ist, haben Verbrecher eine Vielzahl an Techniken entwickelt, um sie zu erkunden, etwa mit Videokameras, die das Eintippen der Geheimzahl aufzeichnen, oder mittels spezieller Computersoftware, um die PIN aus dem Chip einer Karte auszulesen. Dann drohen wirtschaftlicher Schaden und jede Menge juristischer Probleme, denn die Beweislast für einen PIN-Missbrauch liegt in Deutschland beim Besitzer der Bankkarte.

Mehr Sicherheit für den Verbraucher verspricht ein Ersatz der PIN durch einen biometrischen Datensatz oder eine Kombination aus PIN und Biometrie. Dies gilt auch für alle Bereiche, in denen ein Kennwort oder schlicht der Besitz einer Chipkarte Zugang zu einem kostenpflichtigen Bereich wie einem Fußballstadion verschafft oder persönliche Daten zugänglich macht wie bei der geplanten Gesundheitskarte.

Der Reiz der neuen Technik ist natürlich, dass mehr Sicherheit auf geradezu natürliche Weise entsteht: Der Verbraucher muss keine Zahlenabfolge und kein Passwort erlernen, sondern schlicht einen Finger präsentieren, in eine Linse blicken, ein paar Worte nachsprechen. Denn seine Individualität prägt sich in biometrischen Merkmalen aus wie dem Fingerabdruck, der Iris oder dem Frequenzspektrum der Stimme.

Lücken im Datenschutz

In Firmen und Einrichtungen der Hochtechnologie nutzt man diese Verfahren schon seit einigen Jahren, um sensible Bereiche gegen Unbefugte zu schützen. Ihre Nutzung im Alltag aber ist noch wenig ausgereift, sodass den Chancen für die Nutzer auch neue Risiken gegenüber stehen. Zunächst stellt sich die klassische Frage nach dem Datenschutz. Ein Iris- oder Netzhautscan ließe sich auch unter medizinischen Fragestellungen auswerten. Aus dem Ton der Stimme oder der Sprechweise könnten Algorithmen der Sprachverarbeitung eines Tages auch auf die Gemütsverfassung des Sprechenden schließen (einen Extremfall schilderte der Sciencefiction »Gattaca« 1997: Zur Identifikation dient in der geschilderten Zukunft stets die mittels Blutprobe gewonnene DNA, aus der ganz selbstverständlich Fähigkeiten und Krankheitsrisiken erschlossen werden).

Zu diesem Bereich gibt es außer einigen allgemein gehaltenen Vorgaben etwa im Terrorismusbekämpfungsgesetz noch keine detaillierten gesetzlichen Regelungen. Sollen sich biometrische Verfahren im Verbraucheralltag durchsetzen, sind aber klare und verständliche Gesetze unumgänglich.

Unklar ist auch, was geschieht, wenn der vergleichsweise höhere Schutz der Biometrie versagt. Erstaunlicherweise standen viele Nutzer in einem ersten Praxistest verschiedener Biometrieverfahren dem Einsatz von Fingerabdruckscannern wohl insbesondere aus Gründen der bequemen Handhabung sehr positiv gegenüber, während Verbraucherschutzverbände diese Technik eher ablehnen. Schließlich gibt es im Alltag zu viele Möglichkeiten, sich in den Besitz eines fremden Fingerabdrucks zu bringen. Wenn dann die Beweislast wie bisher beim Geschädigten liegt, dürfte es diesem noch schwerer möglich sein als heute, sein Recht zu erstreiten.

Merkmal mit Verfallsdatum

Vertrauenswürdiger und sicherer als der Fingerabdruck sind nach Auffassung der Verbraucherorganisationen grundsätzlich solche Biometrieverfahren, bei denen der Nutzer aktiv einen Beitrag leisten muss, also beispielsweise Worte nachspricht oder eine Unterschrift auf einem dynamischen Handschriftscanner leistet, der Schreibdruck und Schreibgeschwindigkeit vergleicht. Doch hier zeigt sich ein neues Problem: Solche Merkmale können sich im Laufe des Lebens verändern. Was aber geschieht, wenn eine Person aufgrund dieser Dynamik nicht mehr erkannt wird? Wie kann sie dennoch Zugang zu ihrem Konto oder eine medizinische Versorgung erhalten? Eine Lösung könnten kombinierte Techniken bieten, die einen Wech-

DERMALOG

Wird so die Zukunft aussehen? Ein Ausweis soll künftig auch biometrische Daten enthalten, beispeilsweise den Fingerabdruck als Barcode (auf der Rückseite, hier nicht zu sehen).

AP PHOTO / FABIAN BIMMER

Die Struktur der Iris gilt als ein besonders zuverlässiges biometrisches Merkmal. Irisscanner werden deshalb bereits in einigen sicherheitsrelevanten Bereichen eingesetzt.

sel des biometrischen Verfahrens durch den Nutzer zulassen. Andernfalls müssten die geänderten persönlichen Merkmale im System neu registriert werden. Das Ausmaß dieser Fragen offenbart sich angesichts der Bestrebungen der Bundesregierung, im Zuge einer vorbeugenden Terrorismusbekämpfung den Personalausweis um eine biometrische Komponente zu ergänzen, etwa durch einen digitalen Finger- oder Handabdruck. Allerdings enthält das aktuelle Gesetz keine konkreteren Anforderungen. ◁

Michael Bobrowski hat Elektrotechnik und Energietechnik studiert. Er arbeitet als Referent für Telekommunikation, Post und Medien beim Verbraucherzentrale Bundesverband e. V. in Berlin.

MERKMAL: IRIS

Können diese Augen lügen?

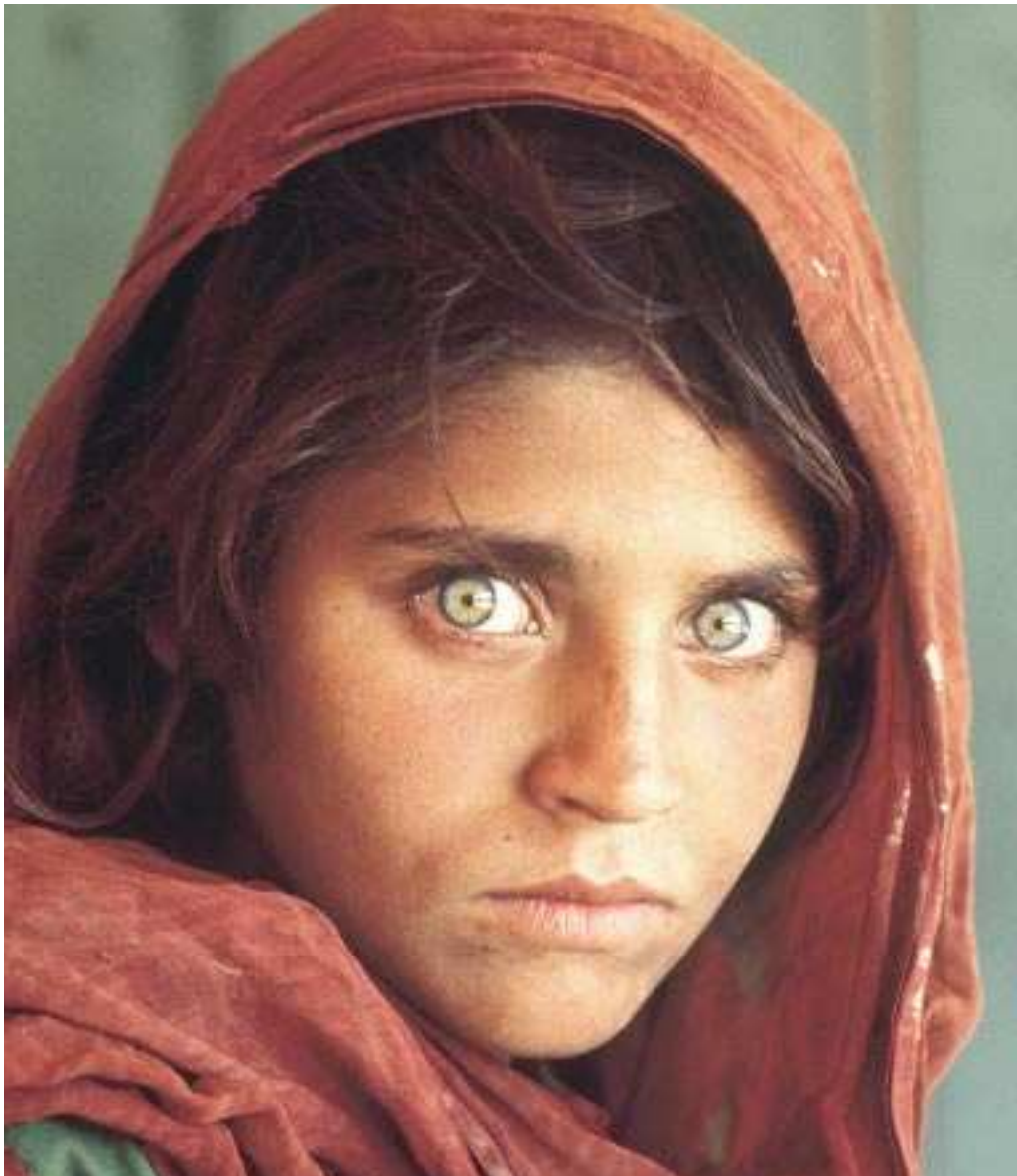
Ob leuchtend grün oder matt braun: Die Struktur der Iris bleibt selbst im Alter erhalten.

Von Christoph Busch, Henning Daum und Georgios Raptis

Dem National Geographic war es eine Titelgeschichte wert: Im Januar 2002 brach ein Fernsehteam auf, um in Pakistan nach einer Frau zu suchen, deren Portrait 17 Jahre zuvor zum Symbol des afghanischen Flüchtlingselends geworden war. Der Fotograf Steve McCurry hatte das Mädchen in einem Lager aufgenommen. Ihre traurigen grünen Augen schlugen jeden Betrachter in ihren Bann. Als es McCurry im vergangenen Jahr gelang, die mittlerweile Erwachsene wieder aufzufinden, half ihm John Daugman, Professor für Computerwissenschaft an der Universität Cambridge (England), die Identität beider Personen anhand eines Irisvergleichs zu verifizieren.

Der Fotograf hätte keinen besseren finden können, denn Daugman ist auf diesem Gebiet ein Pionier. So ziemlich jede kommerzielle Software zur Iriserkennung basiert auf seinem 1994 patentierten Algorithmus. Er hatte erkannt, wie einmalig dieser Bestandteil des menschlichen Auges ist. Die auf Deutsch Regenbogenhaut genannte Struktur regelt wie die Blende beim Fotoapparat die Lichtmenge, die das Auge erreicht (und wie beim optischen Gerät durch Engstellung auf die Tiefenschärfe). Sie besteht aus Bindegewebe, Muskeln und versorgenden Blutgefäßen. Erst in den letzten Wochen der Schwangerschaft bildet sich die Iris vollständig aus.

Dieser Prozess ist nicht genetisch programmiert. Wo im Laufe des Wachstums eine Furche entsteht, ist rein zufällig. Deshalb lassen sich eineiige Zwillinge und sogar die beiden Iris einer Person in verschiedenen Merkmalen unterscheiden: Furchen, Stränge, Löcher und andere Elemente ergeben ein statistisch einmaliges Bild. Da die Iris im Auge gut geschützt ist, verändert sich ihr Aussehen im Laufe der Zeit in der Regel nicht. Die ▷



Not und Elend der afghanischen Flüchtlinge symbolisierte das Foto einer Siebzehnjährigen. Der Fotograf Steve McCurry hat sie nun wieder gesucht, um ihr Schicksal zu erfahren. Ein Irisscan bestätigte die Identität der erwachsenen Frau mit dem Mädchen von damals.

BEIDE BILDER: AG. FOCUS / MAGNUM / STEVE MCCURRY

▷ enorme Vielzahl der Strukturen und ihre möglichen Positionen, die Einmaligkeit und die Stabilität der Merkmale machen die Iris zum geeigneten Kandidaten für eine rechnergestützte Identifikation.

Die Fokussierung der Kamera und die Lokalisation der Iris erfolgen automatisch. Teure Systeme besitzen eine Weitwinkelkamera, im Bild wird zunächst das Auge durch Gesichtsfindungsalgorithmen gesucht, dann die eigentliche Iriserkennungskamera entsprechend eingestellt. Bei den günstigeren Modellen muss der Benutzer bewusst in die Kamera blicken und wird dabei durch ein Lichtsignal geführt. Wenn das Auge lokalisiert ist, stellt das Gerät mit handelsüblichen Autofokus-Verfahren auf die Iris scharf. Zur Beleuchtung bei der Aufnahme wird das Auge für etwa zwei Sekunden mit Infrarotlicht einer Wellenlänge von 700 bis 900 Nanometer bestrahlt, der Energiegehalt entspricht etwa dem Licht einer schwachen Taschenlampe.

Leider kann auch eine zusätzliche Beleuchtung keine immer gleichen Bedingungen bei der Aufnahme herstellen. Der Abstand, den der Benutzer am Tag des Enrolments (siehe Beitrag Seite 76) zur Kamera eingenommen hatte, wird später um einige Zentimeter abweichen. Deshalb erscheinen seine Augen dem System nicht immer gleich groß und hell. Je nach Umgebungshelligkeit dürfte auch die Pupille verschieden weit geöffnet sein. Schließlich variieren auch die optischen Achsen der Aufnahmen. Alle diese Unwägbarkeiten muss die anschließende mathematische Analyse ausgleichen.

Anwendung am Flughafen

Dazu muss die Iris zunächst von den anderen Komponenten des Auges abgegrenzt werden: Pupille, Augenweiß (Sclera) und Lider. Dazu dienen Algorithmen der Bildverarbeitung. Vom Zentrum der Pupille ausgehend arbeitet sich beispielsweise ein Kantenerkennungsalgorithmus konzentrisch nach außen und findet so die Pupillen- sowie die äußere Irisgrenze. Ein ähnliches Verfahren ermittelt obere und untere Lidgrenze. Nachdem die Fläche der Regenbogenhaut nunmehr aus der Aufnahme extrahiert ist, lassen sich ihre Muster bestimmen. Nicht anders als man den Amplitudenverlauf beim Sprechen durch eine Summe von Sinusfunktionen aufbauen kann und so eine Abbildung dieses Verlaufs auf ein Frequenzspektrum erhält, werden abgegrenzte

Bereiche des Irismusters auf 2-D-Gabor-Wavelets genannte Funktionen projiziert. Deren »Spektralverteilung« enthält keine Amplituden der Lichtintensität mehr, sondern lokale Informationen über die Verhältnisse der Frequenzanteile zueinander (fachlich: die Phaseninformationen). Diese Angaben ändern sich nicht so stark wie die der Amplituden, wenn das Bild aufgrund von Kameraproblemen gestört wird. Das Ergebnis der Analyse ist ein 2048 Bit großer »Iris-Code« zusammen mit ebenso vielen »Maskierungs«-Bits, die unbrauchbare Bereiche der Iris etwa durch Lidverdeckung oder Reflexionen benetzter Bereiche ausblenden helfen.

Der Vergleich mit dem Template erfolgt dann bitweise über logische Operatoren (XOR). Er liefert die Anzahl unterschiedlicher Bits zwischen den verglichenen Iris-Codes. Ein Test mit 4258 verschiedenen Irisbildern, von denen jedes mit allen anderen verglichen wurde, ergab: Die Wahrscheinlichkeit, dass zwei unterschiedliche Iris in mehr als 67 Prozent ihrer Iris-Codes übereinstimmen, liegt bei etwa 1 zu 26 Millionen. Ein solcher Wert ist für ein biometrisches Verfahren extrem gut. Als Kriterium bei der Abfrage gilt deshalb: Bei weniger als 33 Prozent Abweichung gilt eine Person als identifiziert.

Ein Prototyp wurde im Oktober 2001 im Schiphol-Flughafen in Amsterdam in Betrieb genommen, im Oktober letzten Jahres wurde die Pilotphase abgeschlossen. Von Schiphol aus pendeln Geschäftsleute in verschiedene Länder. Das System dient primär der beschleunigten Kontrolle bei der Einreise. Der Reisende wird im System registriert (Enrolment), ein Grenzbeamter überprüft dabei seine Identität. Eine Chipkarte speichert den Iris-Code zusammen mit den Personalien. Sie muss bei der nächsten Reise nur noch in ein spezielles Terminal eingeführt werden, dann blickt der Nutzer in eine Kamera und kann gegebenenfalls ohne weitere Kontrollen passieren. Etwa 3000 Geschäftsleute nutzen die Vorteile dieser Karte.

Ein Irismuster oder der Iris-Code ist etwas Persönliches, es muss entsprechend gegen missbräuchliche Nutzung geschützt werden. Die Diskussion geht aber über den reinen Datenschutz noch hinaus. Es gibt Ansätze, aus der Iris auch medizinische Informationen abzulesen. So ließe sich angeblich ermitteln, ob der Benutzer Augentropfen gegen grünen Star einnimmt. Die Wissenschaftlichkeit solcher Verfahren gilt aber als zweifelhaft, sodass ein Missbrauchspotenzial der Daten bislang unwahrscheinlich ist. ◁

Der promovierte Informatiker **Christoph Busch** leitet die Abteilung Sicherheitstechnologie des Fraunhofer-Instituts für Graphische Datenverarbeitung in Darmstadt, in der **Henning Daum** als Diplominformatiker wissenschaftlicher Mitarbeiter ist. **Georgios Raptis** ist Arzt und angehender Diplominformatiker an der TU Darmstadt.

LITERATURHINWEISE

Biometrik: Fingerabdruckerkennung. Ausarbeitung des Seminars Biometrics am Institut für Informatik der WWU Münster, Wintersemester 2002/2003.

Biometrische Identifikationsverfahren. Bewertungsverfahren zum Vergleich biometrischer Verfahren: Kriterienkatalog. TeleTrusT Deutschland e.V. Arbeitsgruppe 6, Version 2.0 10.07.2002. www.teletrust.de

Der Aktuelle Begriff. Deutscher Bundestag Nr. 30/2001. www.bundestag.de/aktuell

How Iris Recognition Works. Von John Daugman, 2003. http://www.cl.cam.ac.uk/users/jgd1000/irisrecog.pdf

Iridology: not useful and potentially harmful. Von E. Ernst. Archives of Ophthalmology, Januar 2000, Heft 118(1), S. 120/121.

1953

Elektrokardiographie beim Ungeborenen

Von der Bauchoberfläche der Mutter läßt sich das Elektrokardiogramm unter Verwendung eines besonderen Schwachstromverstärkers … schon im dritten Monat der Schwangerschaft ableiten. Das Verfahren eignet sich somit zur Frühdiagnose der Schwangerschaft, wobei ein besonderer Vorteil darin zu sehen ist, daß im Gegensatz zu den biologischen Schwangerschaftsreaktionen das Resultat sofort zur Verfügung steht … Die größte Bedeutung erlangt die fetale Elektrokardiographie, wenn es zu entscheiden gilt, ob die Frucht etwa abgestorben ist … (Umschau, 53. Jg, Heft 13, 1.

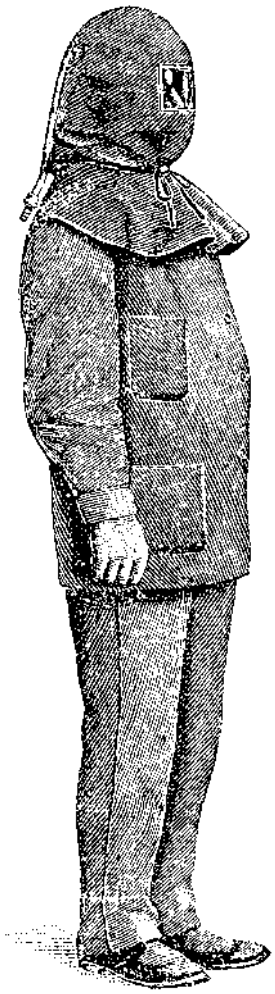
Welches ist der längste Fluß der Erde?

Nach einer Mitteilung der Bundesanstalt für Landeskunde haben neue Berechnungen ergeben, daß die alte Schulweisheit, der Mississippi und Missouri sei das längste Flußsystem der Erde, nicht aufrecht erhalten werden kann. Der längste und zugleich wasserreichste, also praktisch der größte Strom der Erde, ist der Amazonenstrom in Südamerika mit 6518 Kilometer. Ihm folgt der alt-ehrwürdige Nil mit dem Kagera, die zusammen eine Länge von 6324 Kilometer haben und dann erst kommen Nordamerikas Riesen, der Mississippi mit Missouri, zusammen 6051 Kilometer. Der längste Strom Asiens ist der Jangtsekiang. (Orion, 8. Jg, Nr. 13/14, Juli 1953)

Batterielose Fernsprecher

Eine interessante Anwendung sind die Autobahn-Fernmeldesäulen, die erstmalig auf der Strecke Frankfurt – Bonn von der Siemens und Halske AG. aufgestellt wurden. … Man kann von jeder Säule aus die nächste Straßenmeisterei anrufen. In der entgegengesetzten Sprechrichtung ist das mit dem Trichter ausgerüstete Telephon in 40 bis 50 cm Abstand noch gut vernehmbar. Diese Lautsprecherwirkung wird dadurch ermöglicht, daß in der Straßenmeisterei in ein Kohlemikrophon gesprochen wird. Dort steht ja das Lichtnetz und damit auch Speisestrom zur Verfügung, während die Zuführung des Speisestroms zu jeder Fernmeldesäule mit erheblichen Mehrkosten verbunden gewesen wäre. (Umschau, 53. Jg, Heft 14, 15. Juli 1953, S. 427)

◀ Unter der hochgehobenen Klappe erkennt man die Öffnung des Trichters, an dessen schmales, oberes Ende das batterielose System angesetzt ist.



Schutzmaske gegen Staub

In manchen Betrieben kann es zweckmässig sein, den Arbeiter mit einer Staubmaske auszurüsten … Bei der Staubmaske ist eine Zuleitung für die Luft von aussen in der Weise vorgesehen, dass das in der Maske befindliche Aluminiumrohr ein Anschlussstück für die Luftleitung hat, während die innere Mündung des Anschlussstückes mit Filz ausgepolstert ist, um jeden Druck auf den Kopf des Arbeiters nach Möglichkeit zu vermeiden. Durch vorgesehene Vertheiler wird die zugeführte frische Luft innerhalb der Maske über das Gesicht des Arbeiters vertheilt. (Hannoversches Gewerbe-

◀ Die Staubmaske wird durch ein kräftiges Band am Halse des Arbeiters befestigt.

Telephon als Operationsbesteck

In Londoner Krankenhäusern wird seit einiger Zeit der Fernsprecher als Hilfsmittel beim Suchen von Kugeln oder anderen metallischen Gegenständen im menschlichen Körper benutzt. … Mit einem Fernhörer sind durch Drähte einerseits eine Sonde, andererseits eine Plattte verbunden, die Platte wird an den Körper des Patienten angelegt; zur Herstellung einer innigen Verbindung legt man einen nassen Schwamm oder mit Salzwasser getränktes Fliesspapier unter. Der Arzt nimmt den Fernhörer an das Ohr. Führt man die Sonde in die Wunde ein, so ist der Stromkreis geschlossen, wenn die Sonde den metallischen Köper berührt; sie vibriert dann, und in dem Fernhörer ist ein Summen vernehmbar. (Der Mechaniker, Jg. 11,

1903

Aus dem Leben der Ameisen

Zu den merkwürdigsten Zügen des Ameisenlebens gehören die Vergesellschaftungen zwischen Ameisen verschiedener Arten. Wheeler macht Mitteilung über die Symbiose zwischen Myrmica brevionodis Emery und der kleinen Leptothoraxart. Die letztere Art stellt sich im Nest der größeren eine Kammer her. Nur in einem Falle sah Wheeler eine Ameise dieser Art selbst Honig holen. Meistens erbettelten sie sich Nahrung von den Arbeitern der Myrmica, welchen sie auf den Rücken stiegen und sie beleckten. (Der Stein der Weisen, Bd. 29, S. 216, 1903)

WAVELIGHT LASER TECHNOLOGIE AG

Laser für Leser

Verdampfen von Hornhaut korrigiert Augenfehler.

Von Bernhard Gerl

Gutes Sehen ist nicht jedem gegeben: Ist das Auge etwas zu lang geraten, erscheinen weit entfernte Objekte unscharf, ist es zu kurz, sieht man nur in der Nähe gut (siehe Bild unten). In beiden genannten Fällen fokussieren Hornhaut und Linse die Lichtstrahlen nicht auf die Netzhaut, und zusätzliche Linsen etwa in Form einer Brille müssen die Lage des Brennpunkts korrigieren. Alternativ dazu kann durch einen operativen Eingriff direkt an der Hornhaut die Sehschärfe wieder hergestellt werden.

Das Werkzeug dazu ist ein Operationslaser, die Methode heißt deshalb Lasik (*Laser in-situ Keratomileusis*, Letzteres ist der medizinische Fachbegriff für eine Behandlung der Augen-Hornhaut). Bei diesem Verfahren schneidet ein automatisch gesteuertes Hobelmesser die Hornhaut dünn ein. Der Arzt klappt sie dann wie einen Deckel auf und kann das nun offen liegende Gewebe mit ultravioletten Lichtpulsen eines ArF-Excimer-Lasers (Wellenlänge 193 Nanometer) schichtweise verdampfen, um so die Brechkraft der Hornhaut zu verändern.

Bei Kurzsichtigkeit flacht er den zentralen Bereich der Hornhaut ab; das vermindert die Brechkraft und der Fokus des Auges bewegt sich in Richtung Netzhaut. Weitsichtigkeit wird durch Abtragen der Ränder der freigelegten Hornhaut behoben – Krümmung und damit Brechkraft wachsen. In der Regel werden, je nach dem Grad der Fehlsichtigkeit, 10 bis 40 Mikrometer Hornhaut verdampft. Der nur 0,95 Millimeter große Brennfleck des Strahls trifft 200-mal in der Sekunde und trägt dabei jeweils von 0,2 bis 0,5 Mikrometer Gewebe ab. Wenige Minuten später ist die Operation beendet und der Arzt klappt den Hornhautlappen wieder zurück und drückt ihn auf das behandelte Gewebe auf.

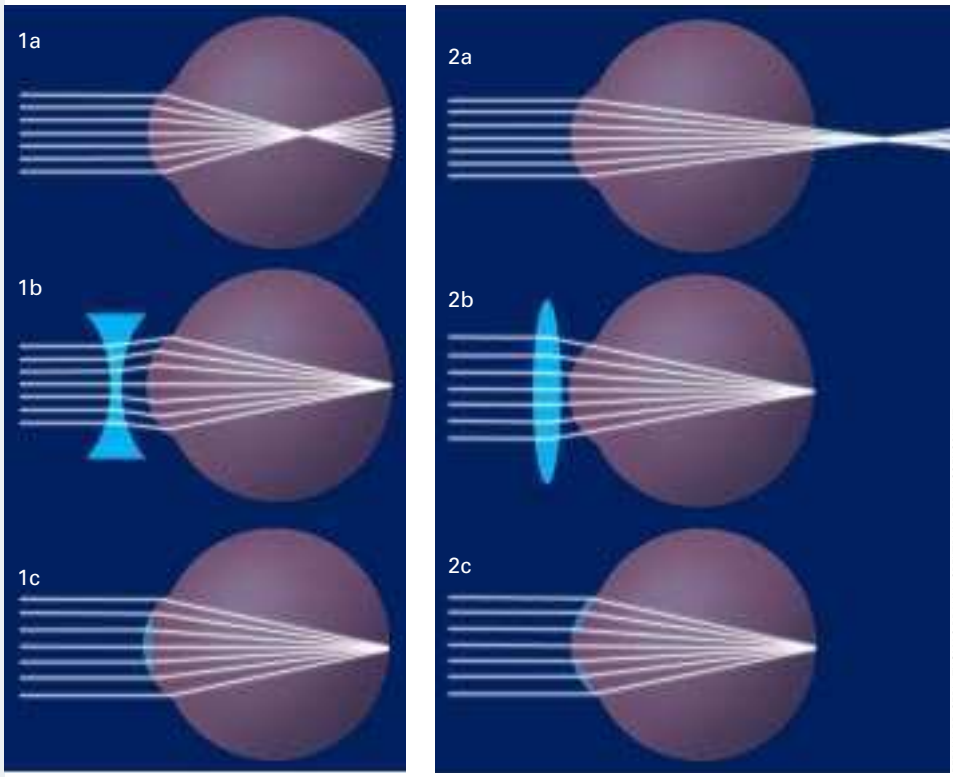
Der Lappen wächst bereits nach kurzer Zeit wieder fest an, sodass die Wunde sehr schnell heilt und der Patient bald wieder gut sehen kann. Als zusätzlicher Schutz wird oft für einige Tage eine weiche Kontaktlinse eingesetzt. Das Verfahren ist inzwischen erprobt: Im Jahr 2001 wurden in deutschen Kliniken und Praxen etwa 80 000 Augen mit Lasik behandelt.

WAVELIGHT LASER TECHNOLOGIE

Bei der Operation wird ein Hornhautdeckel eingeschnitten und zurückgeklappt. Mithilfe eines Laserstrahls wird das Hornhautgewebe abgetragen.

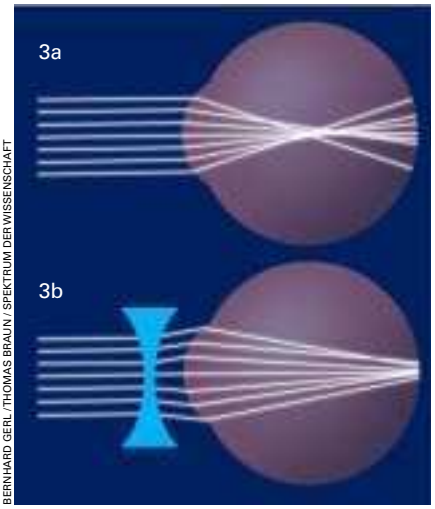
Die Kunst besteht darin, die Operation so zu planen, dass nur die unbedingt erforderliche Menge Hornhaut an der richtigen Stelle entfernt wird. Bei der Standard-Lasik nutzt der Arzt dazu Angaben des Patienten, indem er durch Sehtests das Maß der Fehlsichtigkeit bestimmt und die Geometrie des Auges vermisst.

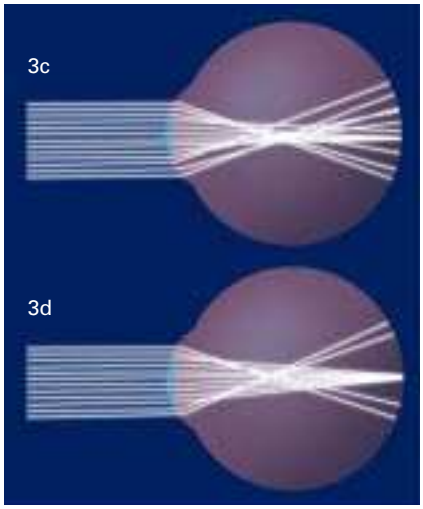
Wie jedes andere optische System erzeugen die Bestandteile des menschlichen Auges – Hornhaut, Hornhautrückfläche, Linse und Glaskörper – auch Brechungsfehler höherer Ordnung. Sie werden wichtig, wenn die Pupille weit offen ist, zum Beispiel beim Autofahren in der Nacht. Es zeigte sich, dass die Standard-Lasik das Nachtsehen deutlich verschlechterte: Gegenstände erschienen den Patienten auf komplexe, unsymmetrische Weise verzerrt. Diese individuellen Fehler der Augen konnten bislang weder gemessen noch korrigiert werden.



BERNHARD GERL / THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

In einem zu langen Auge befindet sich der Brennpunkt vor der Netzhaut und weit entfernte Objekte erscheinen unscharf – dieses Auge ist kurzsichtig (1a). Umgekehrt verhält es sich bei der Weitsichtigkeit: Ein entfernter Gegenstand wird hinter die Netzhaut projiziert (2a). Abhilfe schaffen Brille oder Kontaktlinse, da sie das Licht je nach Bedarf streuen oder sammeln und so die Brennweite des gesamten optischen Systems korrigieren (1b, 2b). Einen vergleichbaren Effekt soll das Abtragen von Hornhaut erreichen, weil dadurch deren Brechkraft eingestellt wird (1c, 2c).





BERNHARD GERL / THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Die Firma WaveLight in Erlangen, einer der führenden Hersteller von Operationslasern für das Auge, entwickelte deshalb zusammen mit Universitäten und Ärzten die wellenfrontgeführte Lasik.

Bei diesem neuartigen Verfahren sendet ein Neodym:YAG-Laser (Wellenlänge 532 Nanometer) 168 dünne parallele Strahlen durch eine Lochmaske auf die Netzhaut. Wäre das Auge ein optisch ideales System, müsste dort ein unverzerrtes Punktmuster erscheinen. Doch auf dem Weg durch Hornhaut, Linse und Glaskörper werden die Strahlen entsprechend den lokalen optischen Fehlern von ihrem Weg abgelenkt. Das von der Netzhaut reflektierte Punktmuster wird dann von einer Kamera aufgenommen und mit einem Computer ausgewertet. Der Arzt hat nun eine Möglichkeit zur objektiven Beurteilung der optischen Qualität des Auges und kann die gewonnenen Daten für die Lasik-Operation verwenden.

Das Verfahren setzt allerdings voraus, dass die Diagnose- und Therapiegeräte stets auf die Pupillenmitte zentriert bleiben. Dazu muss der Patient einen bestimmten Punkt fixieren. Abweichungen von 0,1 Millimeter sind schon zu viel. Das Problem ist nur: Das Auge führt unwillkürlich unablässig sehr feine Bewegungen aus (diese verbessern den Kontrast und verhindern zudem, dass die Rezeptoren ein fixiertes Objekt aufgrund von Gewöhnung nicht mehr wahrnehmen können). Lasergeräte von WaveLight bestimmen deshalb 200-mal in der Sekunde die aktuelle Position des Auges mit infrarotem Licht, der Diagnose- oder Therapiestrahl wird durch einen beweglichen Spiegel entsprechend nachgeführt.

Zum optischen System des menschlichen Auges tragen Hornhaut, Hornhautrückfläche, Linse und Glaskörper bei. Es entstehen deshalb auch Brechungsfehler höherer Ordnung und damit – vor allem beim Nachtsehen, also weit offener Pupille – der Eindruck eines auf komplexe, unsymmetrische Weise verzerrten Bildes (3a). Durch Brillen oder Kontaktlinsen können diese Abbildungsfehler höherer Ordnung nicht korrigiert werden (3b). Bei der Standard-Lasik wurden sie sogar schlimmer (3c). Erst die wellenfrontgeführte Variante verbesserte das Nachtsehen (3d).

Die Entwickler planen bereits den nächsten Schritt: Um das Auge noch besser vermessen zu können, sollen adaptiv-optische Systeme eingesetzt werden. Diese Technik wurde für die Astronomie entwickelt, um die durch die unruhige Erdatmosphäre verursachten Abbildungsfehler zu kompensieren. Das geschieht mit einem Spiegel, dessen Form über eine Vielzahl von Verstellelementen ständig so verändert wird, dass er eine Wellenfront optimal reflektiert. Das soll einen hochaufgelösten Blick von außen auf die Netzhaut ermöglichen, mithin die Vermessung der optischen Fehler noch genauer machen, als es die mit dem Punktemuster schon ist. Mithilfe eines solchen Systems ist es kürzlich Forschern von der ETH Zürich erstmals gelungen, die einzelnen Sehzäpfchen auf der Netzhaut zu fotografieren und die drei verschiedenen Typen dieser Rezeptoren zu unterscheiden. ◁

Der studierte Physiker **Bernhard Gerl** arbeitet als Fachautor in Regensburg.

GESUNDHEIT

Wenn Fett zur Sucht wird

Der wohlhabende Teil unserer Weltbevölkerung lebt im absoluten Überfluss. Das epidemische Ausmaß mit dem sich die Fettsucht derzeit auf der Welt ausbreitet, zeigt, dass die Folgen uneingeschränkten Genusses uns zum Verhängnis werden können.

Von Pia Prasch

Nicht nur Amerikaner werden immer dicker, auch auf deutschen Hüften sammeln sich die überschüssigen Pfunde in bedenklichem Ausmaß an. Über die Hälfte der Erwachsenen ist übergewichtig, fast zwanzig Prozent leiden an krankhafter Fettsucht, so genannter Adipositas. Sogar Kinder verfetten immer häufiger und vor allem immer früher: Heute ist ungefähr jedes fünfte Kind zu dick.

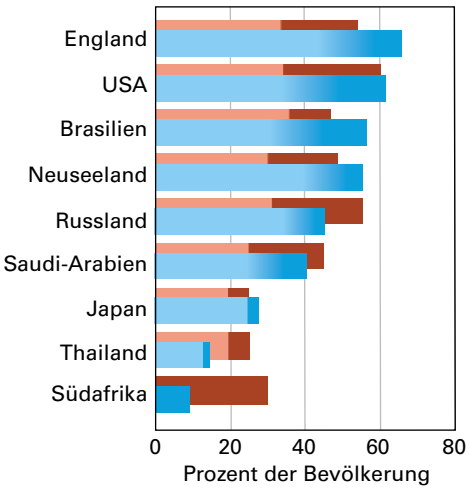
Aber was genau ist eigentlich Fettsucht, und ab wann ist man nicht mehr nur dick, sondern adipös? Laut Weltgesundheitsorganisation (WHO) handelt es sich um Fettsucht, also Adipositas, sobald der Anteil der Fettmasse am gesamten Körpergewicht bei Frauen dreißig Prozent und bei Männern zwanzig Prozent übersteigt. Mithilfe des Körpermassenindexes (*body mass index* = BMI) kann jeder seine individuelle Fettmasse berechnen, indem er sein Gewicht durch das Quadrat der Körpergröße teilt: BMI = Körpergewicht in Kilogramm/(Körpergröße in Metern)^2. Ergibt dies einen Wert über 30, lautet die Diagnose Fettsucht, und es wird höchste Zeit zu handeln. Als Indikator für Übergewicht muss aber auch ein Wert ab 25 nachdenklich stimmen, denn übermäßige Körperfülle ist nicht nur ein kosmetisches Problem: Sie scheint fast zwangsläufig Folgekrankheiten wie Bluthochdruck, Zuckerkrankheit (Diabetes mellitus) und Fettstoffwechselstörungen nach sich zu ziehen. Auf Grund ihrer Häufigkeit ist die oftmals tödliche Kombination dieser Krankheiten auch als metabolisches Syndrom bekannt, mit dem das Risiko für Herzinfarkt und Schlaganfall explosionsartig in die Höhe schnellt. Über achtzig Prozent aller Diabetiker mit Diabetes mellitus sind zu dick, und auch immer mehr Kinder leiden an der eigentlich altersbedingten Zuckerkrankheit. Kein Wunder, wenn man bedenkt, dass sich die Zahl der fettsüchtigen Zehnjährigen in den Industrienationen in den letzten 25 Jahren verdreifacht hat.

Es deutet also alles auf ein Wohlstandsleiden hin, hervorgerufen durch erhöhte Energiezufuhr aus kalorienreicher Nahrung, bei zugleich sinkendem Energieverbrauch durch mangelnde Bewegung. Vor hundert Jahren machte der Fettanteil der Nahrung bei den Deutschen im Durchschnitt nur 20 bis 25 Prozent aus. Heute hat er sich auf rund vierzig Prozent verdoppelt, auf Kosten der Kohlenhydrate. All das klingt nach selbst verschuldeter Verfettung. Bleibt nur die Frage, warum manche Menschen trotz ungesunder Lebensführung gertenschlank aussehen. Vielleicht sind ja doch die Gene schuld? Erwiesen ist, dass der Grundumsatz, also die Energie, die zum Aufrechterhalten der Körperfunktionen in Ruhe verbraucht wird, zu einem gewissen Grad genetisch festgelegt ist. Menschen mit niedrigem Grundumsatz verbrauchen in Ruhe wenig Energie und speichern den Überschuss deshalb als Fett. Übergewicht verursachen aber nur teilweise die Gene, denn sie bringen lediglich die Veranlagung dafür mit. Häufen sich die Pfunde, liegt das meist an falschem Essverhalten und Bewegungsfaulheit.

Auf der Suche nach den Ursachen

Während Forscher und Mediziner darin übereinstimmen, dass eine erfolgreiche Therapie gesunde Ernährung und viel körperliche Aktivität voraussetzt, geht die Suche nach der Wunder wirkenden »Schlankheitspille« weiter. Den physiologischen Ursachen für Fettleibigkeit ist man teilweise auch schon auf die Spur gekommen. Mit der Entdeckung des Stoffwechselhormons Leptin gelang Jeffrey Friedman von der Rockefeller Universität New York 1994 ein Durchbruch im Verständnis der Langzeitregulation des Körpergewichts. Die Leptin-Konzentration

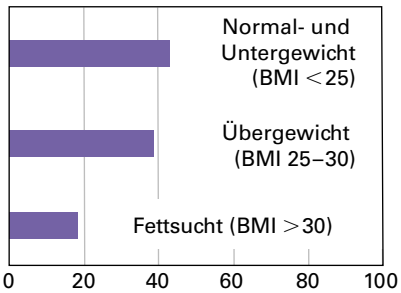
Anteil der Übergewichtigen und Fettsüchtigen



Übergewicht und Adipositas sind nicht nur in den reichen Industrienationen ein Problem. Auch in den Entwicklungsländern nimmt die Zahl der Fettsüchtigen rasant zu. Vor allem die Stadtbevölkerung ist betroffen.

36 Millionen Deutsche bringen zu viel auf die Waage. Das entspricht 57 % der Erwachsenen. 18 % von ihnen sind mit einem BMI über 30 sogar adipös und damit behandlungsbedürftig.

Gewichtsverteilung in Deutschland



THOMAS BRAUN, SDW; NACH: HEALTHCARE ACCESS PANEL IM AUFTRAG DER HOFFMANN-LA ROCHE AG

ROCHE

Übergewicht ist weltweit eines der zehn schwerwiegendsten Gesundheitsprobleme. Adipositas rangiert in den Industrienationen sogar auf Platz fünf.

im Blut informiert das Gehirn über die vorhandenen Energiereserven in Form von Körperfett und stimmt das Essverhalten auf sie ab. Ist der Fettspeicher voll, reduziert ein hoher Leptin-Spiegel das Hungergefühl. Bei mangelndem Körperfett sinkt die Konzentration des Hormons und sorgt dafür, dass wir mehr essen. Die Mehrheit der Fettsüchtigen scheint allerdings resistent gegen die Wirkung des Leptins zu sein. Trotz hoher Hormonkonzentration bleibt bei ihnen das Hungergefühl erhalten.

Vor kurzem wurden zwei weitere Hormone entdeckt, die Einblicke in die Kurzzeitregulation des Energiehaushalts gestatten. Ein im Magen produziertes Hormon (Ghrelin) sorgt kurzfristig für ein Hungergefühl, indem seine Konzentration vor dem Essen ansteigt. Das appetithemmende Hormon PYY lässt uns die Mahlzeit wieder beenden. Beide könnten neue Ansatzpunkte sein, um in die täglich ablaufende Steuerung des Appetits einzugreifen. Da der Regulationskreis jedoch von vielen Faktoren abhängt, die auch Einfluss auf Fortpflanzungsfähigkeit und Immunabwehr haben, ist es sehr riskant, in ein derart komplexes System einzugreifen.

Fett schützt sich selbst

Vielleicht entscheidet bei Säugetieren auch ein einziges Eiweißmolekül auf der Oberfläche der Lipidtröpfchen, die im Fettgewebe eingelagert sind, über die Schlankheit der Figur. Im Versuch verloren Mäuse, denen der Eiweißstoff Perilipin fehlte, weil das verantwortliche Gen inaktiviert worden war, trotz kalorienreicher Nahrung siebzig bis achtzig Prozent ihres Körperfettes. Verglichen mit »Kontrollmäusen« wurden ihre Fetttröpfchen wegen des fehlenden Schutzmantels sehr viel schneller abgebaut. Die Tiere waren durchweg schlanker und muskulöser. Forscher des Max-Planck-Instituts für biophysikalische Chemie in Göttingen entdeckten nun, dass dieser Mechanismus bei der Taufliege sehr ähnlich ist. Das Lieblingstier der Genetik soll nun als Modellorganismus bei der Entwicklung neuer Therapien gegen Fettleibigkeit beim Menschen helfen.

Derartige Eingriffe ins Stoffwechselsystem können die Umstellung der Lebensgewohnheiten jedoch nicht ersetzen. Selbst wenn es schließlich gelänge, die Veranlagung zum Übergewicht wegzutherapieren, wäre das zu Grunde liegende Problem nicht gelöst. Mit Medikamenten und Gentherapie kann es höchstens gelingen, die unangenehmen Folgen unserer Genusssucht einzudämmen. Es stimmt, dass einige Menschen auf Grund ihrer Gene anfälliger für Fettsucht sind als andere.

Diese Veranlagung ist evolutionsgeschichtlich betrachtet aber durchaus nicht neu. Auch unsere Vorfahren waren unterschiedlich gute Fettverwerter. Im Gegensatz zu heute war es in der Steinzeit aber von erheblichem Vorteil, überschüssiges Fett als Reserve für schlechte Zeiten zu speichern. In einer Umwelt, in der Nahrung knapp ist und nur mit großer körperlicher Anstrengung beschafft werden kann, ist ein niedriger Grundumsatz Gold wert. In einer Zeit des Überflusses, wie wir sie in der westlichen Welt erleben, in der es keine Notzeiten mehr gibt, kann solch ein »archaischer« Stoffwechsel schnell zum Verhängnis werden. Die Lebensumstände haben sich derart rasant verändert, dass unsere Körper nicht in der Lage waren, sich den neuen Umständen schnell genug anzupassen. Die kulturelle Evolution hat die biologische sozusagen überholt. Angesichts der Tatsache, dass die Industrie am Trend zum übermäßigen Genuss ganz fabelhaft verdient, kommen wir um die nötige Eigeninitiative im Kampf gegen die Fettsucht offensichtlich nicht herum.

Es gibt Hinweise darauf, dass das lebenslange Essverhalten schon im frühen Kindesalter festgelegt wird. Die »Set-Point-Theorie« besagt, dass der menschliche Organismus ständig sein individuelles, erblich festgelegtes Sollgewicht ansteuert, das sowohl über als auch unter dem ersehnten Idealgewicht liegen kann.

Die alles entscheidende Kindheit

Durch übermäßiges Essen in der Kindheit werden zusätzliche Fettzellen angelegt, die ein Leben lang erhalten bleiben und das Sollgewicht nach oben verschieben. Kontrolliertes Essen in der Kindheit zahlt sich also aus, denn einmal angelegte Speicherzellen warten nur darauf, mit Fett gefüllt zu werden. Dies zu verhindern erfordert ein enormes Maß an Selbstdisziplin. Genau an dieser mangelt es bisher aber offensichtlich, denn die Fettsucht breitet sich derzeit wie eine Epidemie auf dem Globus aus. Laut WHO sind heute weltweit 300 Millionen Menschen adipös. Allein in Deutschland verursacht die Krankheit jedes Jahr Kosten von mehr als 16 Milliarden Euro. Die Zahl der weltweit im Zusammenhang mit Übergewicht stehenden Todesfälle schätzt der »World Health Report« 2002 auf 2,5 Millionen, bis 2020 wird sogar ein Anstieg auf 5 Millionen vorausgesagt. ◁

Pia Prasch ist Diplombiologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

AVATARE

Virtuelle Menschen in Echtzeit

Ob am Bahnhof, im Geschäft oder im Haushalt: Geht es nach dem Willen von Wissenschaftlern, sollen uns proaktive, autonom handelnde digitale Geschöpfe bald im Alltag begleiten.

Von Gunther Jauk

Die Künstliche Intelligenz hat sich verselbstständigt und beschlossen, ihren Erschaffer zu versklaven. In einem schrecklichen Krieg verdunkeln die Menschen den Himmel, um den von Sonnenenergie abhängigen Gegner in die Knie zu zwingen. Die KI siegt trotzdem. Sie deckt fortan ihren Energiebedarf durch Anlage riesiger Menschenfelder. Denn jeder menschliche Körper ist ein Minikraftwerk, das rund 500 Watt produziert – genügend Energie für die Maschinen. Die Menschen merken von all dem gar nichts mehr, ihr Geist lebt in einer riesigen Illusion, einem Computerprogramm, weiter: der Matrix.

Dieses Horrorszenario im gleichnamigen Kino-Kassenschlager ist Gott sei Dank fern jeder Realität. Wirkliche Künstliche Intelligenz gibt es nicht und wird es wahrscheinlich auch in absehbarer Zukunft nicht geben. Derzeit müssen wir uns noch mit digitalen Humanoiden à la Lara Croft zufrieden geben. Mit den heutigen »Avataren« – der Begriff stammt aus der hinduistischen Religion und steht für die Inkarnation von Gottheiten – ist bestenfalls eine reduzierte, einfache Kommunikation per Mausklick möglich.

Das könnte jedoch bald anders werden. »Virtual Humans« steht nämlich unter Umständen eine große Zukunft bevor. US-Marines trainieren schon heute auf virtuellen Schlachtfeldern, und bevor die US-Luftwaffe Länder wie Afghanistan oder den Irak angreift, lässt sie die Piloten gegen virtuelle, an der Universität von Kalifornien entwickelte Flieger-Asse antreten. In der zivilen Forschung dienen virtuelle Zeitgenossen etwa als Crash-Test-Dummies. Den größten Bedarf an willigen Opfern und Mitspielern hat aber die Unterhaltungsindustrie: als Gegner in Computerspielen, als Führer durch das Online-Angebot von Handelsketten und natürlich in Kino und Fernsehen.

Angefangen hat alles in der Werbung: Sie erweckte Hollywoodlegenden wie John Wayne oder Humphrey Bogart wieder zum Leben. Dieselben Verfahren der Einzelbildbearbeitung, Montage und Retuschierung machten es Tom Hanks Mitte der 1990er Jahre in »Forrest Gump« möglich, Richard Nixon, Lyndon B. Johnson und John F. Kennedy die Hand zu schütteln. An den Szenen tüftelten die Mitarbeiter von George Lucas' Firma Industrial Light & Magic (ILM) Pixel für Pixel monatelang, entsprechend teuer waren diese Filmsequenzen.

Inzwischen ist man bei der Produktion neuen Bildmaterials am Computer durch neue Software und vor allem einer dramatisch verbesserten Technik zur Erfassung und Verarbeitung von Körper- und Bewegungsdaten ein ganzes Stück

DPA

weiter. So fertigte zum Beispiel die neuseeländische Firma Weta-Digital für die »Herr der Ringe«-Trilogie zunächst Modelle aller zu animierenden Charaktere in verschiedenen Maßstäben an. Diese Modelle wurden mit einem 3-D-Scanner abgetastet und als digitalisierte Daten abgespeichert. Daraus wurde ein bewegliches Drahtgitter-Skelett generiert und mit Sehnen, Muskeln und Hautschichten überzogen. Das so entstandene virtuelle Geschöpf hat man dann mittels Motion-Capturing animiert.

Wechselspiel der Mimik

Bei diesem Verfahren filmt man die Bewegungen eines realen Menschen (siehe Spektrum der Wissenschaft 3/2001, S. 93). Die Rolle des Gollum übernahm der Engländer Andy Serkis. Er schlüpfte dazu in einen Datenanzug, dessen Sensoren die pantomimischen Bewegungen auf die digitale Kreatur Gollum übertrugen. Zusätzlich wurde Serkis' Gesicht in allen möglichen emotionalen Ausdrucksformen gefilmt und auf das digitale Gesicht von Gollum projiziert. Die möglichst realistische Animation war auf Grund der Schizophrenie des Charakters – ständig schwankend zwischen bösem Gollum und gutem Smeagol – und der dadurch beständig wechselnden Mimik und Gestik besonders schwierig.

Während die Visualisierung also enorme Fortschritte machte, bleibt eine

DPA

Damit die Bewegungen virtueller Video-Menschen möglichst natürlich erscheinen, werden sie von realen Modells elektronisch abgegriffen.

einigermaßen intelligente Kommunikation mit digitalen Persönlichkeiten noch Zukunftsmusik. Avatare monologisieren und beantworten Fragen nur mit vorgefertigten Antworten. Der nächste Schritt ist darum die Programmierung intelligenter, autonom handelnder virtueller Menschen. Ein Avatar soll Aufgaben planen und durchführen können, ohne dass ein Benutzer aus Fleisch und Blut immerfort eingreifen muss. Genau das ist Hauptziel des Ende Januar 2003 offiziell gestarteten Projekts »Virtual Human«. Das Deutsche Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz in Saarbrücken, die Fraunhofer-Institute für Graphische Datenverarbeitung in Darmstadt und für Medienkommunikation in Sankt Augustin sowie weitere Partner aus der Wirtschaft arbeiten an diesem auf vier Jahre veranschlagten interdisziplinären Projekt mit. Das Budget beträgt 12 Millionen Euro, wovon der Bund knapp über die Hälfte beisteuert. Haut, Haare, Augen, Lippen, Körpersprache und Sprachsynchronizität sollen extrem realistisch werden. Laut Projektleiter Wolfgang Wahlster sollen die künstlichen Charaktere mit dem Benutzer in einen »gemischten Dialog« treten können, das heißt, sie stellen selbstständig Fragen, lassen sich unterbrechen oder fallen ihrerseits dem Menschen ins Wort. Durch Betonung und Klang soll ein mehr oder weniger scharfes »Jetzt reicht es aber!« wie im echten Leben verschiedene Bedeutungen haben.

Sinn machen würde ein Einsatz solcher virtueller Menschen etwa für die Auskunft am Bahnhof. Wer diese Angestellten – die weder Gewerkschaften noch Urlaub brauchen – zum Beispiel nach einer Abfahrtszeit fragt, der würde »proaktiv« auch noch die Gleisnummer erfahren. Im Haushalt könnte selbst der größte technische Dilettant seinen Videorecorder einfach mittels akustischem Befehl vom Avatar programmieren lassen. Stellt der Benutzer jedoch provokante oder sinnlose Fragen, soll der Computermensch auch Emotionen zeigen und wütend werden können – mit dazugehörigem grimmigem Gesichtsausdruck, versteht sich. Aber keine Sorge: Im Zweifelsfall hat der »echte« Mensch immer noch die Möglichkeit, den Stecker aus der Dose zu ziehen, wie bei »Matrix« … ◁

Gunther Jauk ist Diplomgeograf und freier Wissenschaftsjournalist in Graz.

KYOTO-PROTOKOLL

Handel mit Emissionsrechten

Lassen sich die international vereinbarten Klimaschutzziele durch den Kauf und Verkauf von Emissionsrechten kostengünstig erreichen? Ein Planspiel testet dieses neuartige marktwirtschaftliche Instrument.

Von Karl-Martin Ehrhart und Joachim Schleich

Es bestehen kaum noch Zweifel daran, dass der sich abzeichnende Klimawandel vom Menschen verursacht wird. Infolgedessen ist zu befürchten, dass die künftigen Umwelt- und Lebensbedingungen durch Überschwemmungen, Artensterben, Ausweitung von Wüsten, Krankheiten oder dadurch ausgelöste Migrationen global beeinträchtigt werden. Um die Klimaerwärmung zu begrenzen, haben sich die Industrieländer 1997 im Rahmen des Kyoto-Protokolls darauf geeinigt, die Emissionen von Treibhausgasen zu reduzieren. Die Europäische Union hat sich dabei verpflichtet, ihre Emissionen an Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und anderer Treibhausgase im Zeitraum von 2008 bis 2012 im Vergleich zum Jahr 1990 um acht Prozent zu reduzieren. Innerhalb der EU-Lastenverteilung kommt dabei Deutschland ein Minderungsziel von 21 Prozent zu.

Um die Emissionsziele möglichst kostengünstig zu erreichen, sieht das Kyoto-Protokoll den Einsatz so genannter flexibler Mechanismen vor: Emissionsrechtehandel, Joint Implementation (gemeinsam durchgeführte Projekte zwischen Industrieländern) und Clean Development Mechanism (Projekte zur Emissionsreduktion in Entwicklungsländern). Der Grundgedanke aller drei flexiblen Mechanismen ist, dass die Reduktionsverpflichtungen der Staaten auch im Ausland erbracht werden können.

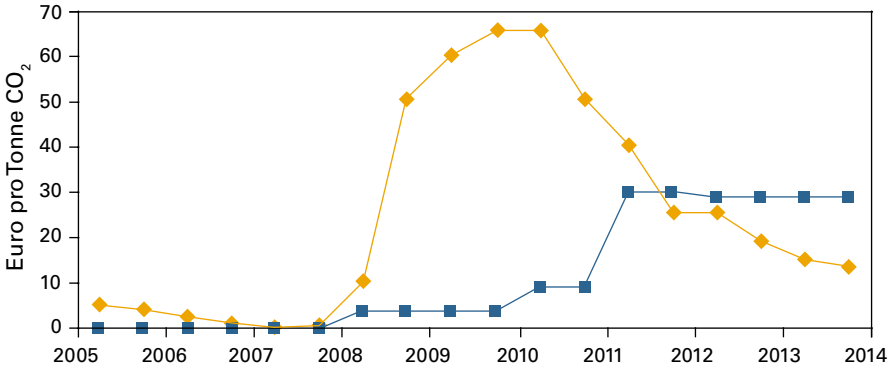
Im Dezember 2002 hat der Rat der EU-Umweltminister beschlossen, den Handel mit CO_2-Emissionsrechten auf Unternehmensebene einzuführen. Davon betroffen sind die Betreiber bestimmter Anlagen, wie größere Strom- und Wärmeerzeugungsanlagen, Raffinerien und Kokereien, Produktionsanlagen der Eisen- und Stahlindustrie, der Zement-, Glas- und Keramikindustrie sowie der Zellstoff- und Papierindustrie. Diese Betreiber müssen von 2005 an jährlich Emissionsrechte in Höhe ihrer ausgestoßenen Menge an CO_2 vorweisen. Ist dies einem Betreiber nicht möglich, werden ihm Sanktionen auferlegt, und er muss die fehlenden Emissionsrechte unmittelbar im nächsten Jahr nachreichen. Überschüssige Emissionsrechte können verkauft oder, falls erlaubt, in späteren Jahren verwendet werden.

CO_2 sparen lohnt sich

Die Möglichkeit, mit Emissionsrechten zu handeln, verspricht eine kostengünstige Erreichung des Emissionsziels: Unternehmen, die ihre Emissionen zu niedrigen Kosten mindern können, werden dies in verstärktem Maße tun – um dann ihre überschüssigen Emissionsrechte zu einem Preis, der höher ist als ihre Minderungskosten, an Unternehmen zu verkaufen, für die Emissionsreduktionen teurer sind (siehe Beispiel im Kasten).

In der Praxis wird das Abwägen zwischen Minderungsmaßnahmen und Handel mit Emissionsrechten allerdings nicht immer einfach sein. Einerseits kann es Jahre dauern, bis große Projekte zur Emissionsminderung durchgeführt sind – etwa wenn ein Stromerzeuger ein Kohle- durch ein Wasserkraftwerk ersetzen möchte. Andererseits kennt ein Unternehmen die Möglichkeiten und Kosten der Emissionsminderung anderer Emittenten in der Regel nicht. Effiziente Entscheidungen der Unternehmen setzen jedoch verlässliche Informationen darüber voraus, wie knapp die Emissionsrechte sind oder künftig sein werden. Diese Aufgabe muss ein funktionierender Markt für Emissionsrechte erfüllen, dem die Unternehmen vertrauen und auf dem die Preise die wahren Knappheitsverhältnisse widerspiegeln. Da die deutsche Umweltpolitik traditionell ordnungspolitisch geprägt ist, liegen bisher – im Unterschied zu anderen EU-Mitgliedsstaaten wie Dänemark oder England – kaum praktische Erfahrungen mit diesem marktwirtschaftlichen Instrument vor.

Vor diesem Hintergrund initiierte Baden-Württemberg im vergangenen Jahr ein Planspiel zum Emissionshandel: Mit 15 Unternehmen aus verschiedenen Branchen wurde der Zeitraum von 2005 bis 2013 simuliert. Als Koordinator fungierte das Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung in Karlsruhe, das gemeinsam mit dem Institut für Wirtschaftstheorie und Operations Research der Universität Karlsruhe und der Beratungsfirma Takon das Planspiel konzipierte und durchführte. Die Teilnehmer konnten somit realitätsnahe Erfahrungen mit dem neuen Instrument sammeln. Zusätzlich ließen sich Rückschlüsse für die Ausgestaltung eines Handelssystems gewinnen. Besonderes Augenmerk galt hierbei dem so genannten Banking, der Übertragung von unge-



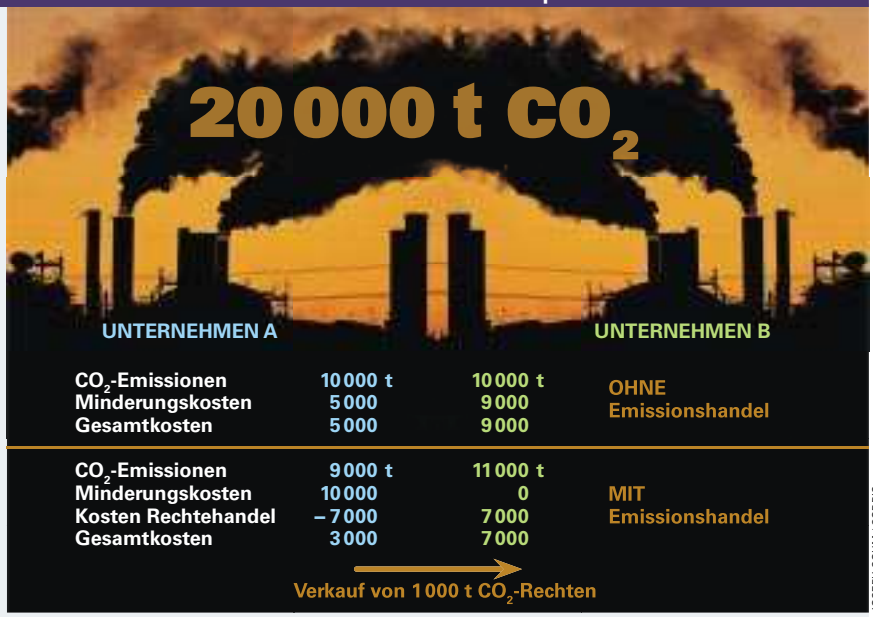
Preisblase an der Emissionsrechte-Börse: Die Kosten pro emittierter Tonne CO_2 steigen im Planspiel zunächst an (gelbe Kurve) und sinken erst nach einigen Jahren wieder auf das theoretische Optimum (blaue Kurve).

nutzten Rechten in das nächste Jahr. Des Weiteren wurde die Preissignalwirkung vorgezogener Auktionen für Emissionsrechte untersucht.

Üben für den Ernstfall

Das Planspiel zeichnete sich durch ein realitätsnahes geschlossenes System aus: Die Unternehmen nahmen mit ihren realen Anlagen sowie mit technisch möglichen Maßnahmen zur Emissionsminderung teil; das Emissionsziel wurde von Jahr zu Jahr verschärft, und beobachtete Größen wie Marktpreise und Handelsvolumina entstanden ausschließlich aus der Interaktion der Teilnehmer am Markt. Parallel zur Unternehmensgruppe wurde das Planspiel mit einer studentischen Kontrollgruppe an der Universität Karlsruhe durchgeführt.

Mit Emissionshandel Kosten sparen



JOSEPH SOHM / CORBIS

Wie sich die Emissionen möglichst kostengünstig reduzieren lassen, mag ein einfaches Beispiel illustrieren: Die Produktionsanlagen der Unternehmen A und B stoßen jeweils 11 000 Tonnen CO_2 pro Jahr aus, zusammen also 22 000 Tonnen. Das staatlich vorgegebene Emissionsziel beträgt jedoch insgesamt nur 20 000 Tonnen CO_2, wobei jedes der beiden Unternehmen Rechte für 10 000 Tonnen Emissionen gratis zugeteilt bekommt. Folglich müssen die beiden Unternehmen ihren Ausstoß an CO_2 um zusammen 2000 Tonnen mindern. Die Kosten dafür sind in der Regel unterschiedlich. Beispielsweise muss Unternehmen A für jede vermiedene Tonne CO_2 5 Euro investieren, während Unternehmen B dafür 9 Euro ausgeben muss.

Reduziert nun jedes Unternehmen für sich den CO_2-Ausstoß jeweils um 1000 Tonnen, so fallen für A Kosten in Höhe von 5000 Euro an und für B 9000 Euro. Somit kostet die gesamte Minderung der Emissionen 14 000 Euro.

Das Emissionsziel von 20 000 Tonnen CO_2 lässt sich jedoch preiswerter erreichen, wenn nur A seine Emissionen mindert. In diesem Falle emittiert B weiterhin 11 000 Tonnen CO_2, während A seine Emissionsmenge um 2000 auf 9000 Tonnen verringert, was nun 10 000 Euro kostet. Der Anreiz für A besteht im Verkauf seiner überschüssigen Emissionsrechte für 1000 Tonnen, sofern dafür mehr als 5 Euro je Tonne erzielt werden können. Da B genau diese Menge an Rechten fehlt und seine Minderung 9 Euro je Tonne kosten würde, wird B bereit sein, diese Rechte für einen geringeren Preis zu kaufen.

Einigen sich beide beispielsweise auf 7 Euro je Tonne, fallen bei B Kosten von 7000 Euro (für den Kauf) an und bei A von 3000 Euro (10 000 Euro Minderungskosten abzüglich 7000 Euro Verkaufserlös). Folglich sind nicht nur die Gesamtkosten kleiner als im zuvor betrachteten Fall, sondern auch die Kosten für jedes der beiden Unternehmen.

Um die Ergebnisse des Planspiels zu bewerten, wurden sie mit dem theoretischen Kostenminimum verglichen. Dieses ist dadurch gekennzeichnet, dass der erforderliche Minderungsbedarf stets durch die Maßnahmen mit den global niedrigsten Kosten (je vermiedene Tonne CO_2) gedeckt wird. Durch diese Vorgehensweise erhält man die optimale Entwicklung des Marktpreises für Emissionsrechte (blaue Kurve in der Grafik). Die großzügige Zuteilung von Emissionsrechten in den ersten Jahren erfordert noch keine kostenträchtigen Maßnahmen. Diese werden erst im Laufe der Zeit notwendig, wenn sich die Emissionsziele verschärfen und dadurch die Kosten für die Vermeidung ansteigen.

In einem ersten Durchlauf des Planspiels erzielten die Unternehmens- und die Kontrollgruppe fast das gleiche Ergebnis. Christian Hoppe von der Universität Karlsruhe weist jedoch darauf hin, dass beide Gruppen das Optimum deutlich verfehlten. Dies wird durch die Abweichung der Marktpreise für Emissionsrechte (gelbe Kurve in der Grafik) von der optimalen Entwicklung im Spiel der Unternehmen ersichtlich. Besonders auffällig, so Hoppe, ist hierbei die Preisblase nach dem Banking-Verbot 2007/2008, also dem Verbot, ungenutzte Rechte von 2007 nach 2008 zu übertragen. Die Preisblase hatte ihre Ursache im Banking-Verbot, in zu späten Entscheidungen für kostengünstige Minderungsmaßnahmen mit langen Vorlaufzeiten und im Anlegen von »Sicherheitsdepots« mit Rechten durch viele Teilnehmer. Dadurch kam es ab 2008 infolge zunehmend strenger werdender Emissionsziele zu einem dramatischen Anstieg des Preises für Emissionsrechte, welcher allerdings die realen Minderungskosten um ein Vielfaches überstieg. Als Folge dieses Preissignals wurden auch viele teure Minderungsmaßnahmen aktiviert, was zu hohen Kosten, einer nachlassenden Nachfrage nach Emissionsrechten und schließlich zu einem Sinken des Preises geführt hat.

Auktion statt Gratisvergabe

Sowohl die Unternehmens- als auch die Kontrollgruppe spielten in einem weiteren Durchlauf eine zweite Variante, die sich von der ersten dadurch unterschied, dass nicht die gesamte Menge an Emissionsrechten gratis an die Unternehmen vergeben wurde, sondern ein gewisser Anteil auf einer Auktion ersteigert wer- ▷

den konnte. Außerdem gab es nun auch Märkte, auf denen Rechte für künftige Emissionen gekauft und verkauft werden konnten. Hierbei wurde an den Märkten weniger gehandelt, da die Auktionen einen Teil des Handels vorwegnahmen. Vor allem bei der Kontrollgruppe konnten positive Lerneffekte gegenüber der ersten Variante beobachtet werden, etwa eine bessere Maßnahmenwahl, geringere Gesamtminderungskosten sowie eine dem Optimum nahe Preisentwicklung auf dem Emissionsrechtemarkt.

Kosteneinsparungen nicht garantiert

Die Ergebnisse des Planspiels zeigen deutlich, dass ein Handelssystem mit Emissionsrechten nicht automatisch die erwarteten Kosteneinsparungen mit sich bringt. Vor allem gilt es, Unsicherheiten auf Seiten der Teilnehmer über künftige Preise zu verringern. Aus diesem Grund sollte die Zuteilung von Rechten möglichst frühzeitig und langfristig erfolgen, fordert Stefan Seifert von der Firma Takon. Zusätzlich kann eine Versteigerung der Emissionsrechte frühe Preissignale generieren und somit die Unsicherheiten verringern und die Effizienz des Systems erhöhen. Ein Banking-Verbot ist dahin zu kritisieren, dass dadurch die zeitliche Flexibilität eingeschränkt und starke Preisschwankungen begünstigt werden, die dann zu einer suboptimalen Auswahl von Minderungsmaßnahmen führen können.

Darüber hinaus wurde auch deutlich, wie wichtig es ist, die Regeln und das Spektrum der möglichen Strategien unter den Betroffenen bekannt zu machen. Schulungen und Informationsoffensiven sind also nicht nur flankierende Maßnahmen, sondern notwendige Voraussetzung für einen funktionierenden Emissionshandel. Ansonsten ist zu bezweifeln, dass sich die Kosteneinsparungen, die Politiker und Wissenschaftler gleichermaßen erwarten, auch einstellen werden. ◁

Karl-Martin Ehrhart ist Dozent für Wirtschaftstheorie, insbesondere Spieltheorie und Experimentelle Wirtschaftsforschung, am Institut für Wirtschaftstheorie und Operations Research der Universität Karlsruhe. **Joachim Schleich** ist Projektleiter für Energie- und Klimapolitik am Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung in Karlsruhe.

KOMMENTAR: Krebsregister am Ende

Musterländle auf dem Weg ins Niemandsland

»Wir können alles – außer Hochdeutsch« rühmt sich Baden-Württemberg in einem Werbeslogan. Doch ganz offensichtlich liegt es hier nicht nur mit der Sprache im Argen. Das wurde spätestens klar, als die Landesregierung kürzlich bekannt gab, ihr Krebsregister schließen zu wollen.

Die Registrierung von Krebsfällen dient der epidemiologischen Statistik. Nur so lässt sich feststellen, wie schädlich etwa Rauchen oder bestimmte Medikamente für die Bevölkerung sind, oder ob das Atomkraftwerk um die Ecke tatsächlich das Krebsrisiko erhöht.

Um zuverlässige Aussagen machen zu können, ist, so sagen Experten, eine Registrierung von mindestens neunzig Prozent der Neuerkrankungen notwendig. Das jedoch sei dem Baden-Württembergischen Krebsregister in den zehn Jahren seit seiner Gründung nicht gelungen, behauptet das Stuttgarter Sozialministerium und begründet damit seine Ausstiegspläne. Eine unzulässige Argumentation, wie Wolf Ulrich Batzler vom Epidemiologischen Krebsregister Baden-Württemberg kontert: Denn die Krebsregistrierung verlief im Südwesten Deutschlands von Anfang an mehr als zaghaft. 1994 wurde mit lediglich drei Landkreisen gestartet, erst vor drei Jahren kamen weitere 16 Kreise hinzu – übrigens erfolgreicher, als die Landesregierung jetzt glauben macht. Dazu kommt, dass im Gegensatz zu einigen anderen Bundesländern leider keine Meldepflicht für neue Krebsfälle besteht – obwohl Epidemiologen dies seit langem fordern. Auf freiwilliger Basis ist aber nun mal kaum eine flächendeckende Registrierung zu erwarten.

Das Argumentationskonstrukt klingt also verdächtig nach faulem Zauber und nach Vorwänden, mit denen eine Entscheidung begründet werden soll, der wahrscheinlich etwas völlig anderes zugrunde liegt: schnöder Mammon. Denn auch Baden-Württemberg muss den Gürtel enger schnallen. Doch angesichts der Haushaltslöcher wirken die 750 000 Euro, die das Krebsregister das Land jährlich kostet, geradezu lächerlich. Ganz zu schweigen von den Therapiekosten, die ein gut geführtes Krebsregister durch die verbesserte Vorsorge einsparen würde.

Von den unsinnigen Sparplänen besonders dramatisch berührt ist die vielfach geforderte Qualitätssicherung bei der Mammografie, die ohne Krebsregistrierung kaum denkbar ist. Warum aber sollte man anderswo in die Weiterbildung von medizinischem Personal und in verbesserte Geräte investieren, wenn an einer ihrer wichtigsten Grundvoraussetzungen, nämlich der epidemiologischen Statistik, gespart wird?

Die Regierung im Ländle steuert also in Sachen Krebsmedizin einen fatalen Rückschritt an – und droht die gesamte Republik mit sich zu ziehen. Denn durch einen Ausstieg Baden-Württembergs würde das drittgrößte Bundesland zum statistischen Niemandsland, das ein geplantes bundesweites Krebsregister vor das Aus stellt. Zumal zu befürchten ist, dass auch andere Landesregierungen es den sparsamen Schwaben gleichtun. So werden wir – falls Stuttgart mit dem Kahlschlag Ernst macht – wohl nie an Skandinavien oder die USA anschließen können. Dort wird Krebsregistrierung schon lange und sehr erfolgreich betrieben.

Höchste Zeit also, dass Baden-Württemberg umdenkt und sich Bundesländer zum Vorbild nimmt, die – statt am falschen Platz zu sparen – lieber auf die Verbesserung ihrer Krebsregister setzen. Mit Kehrwoche und dreizackigen Sternen allein ist noch kein Musterländle zu machen.

Stefanie Reinberger

Die Autorin ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

ZOOLOGIE

Boris Culik

Pinguine

Spezialisten fürs Kalte

Neues über die sympathischen Vögel auf dem Eis

BLV, München 2002, 160 Seiten, € 39,90

Auch ohne kindlich große Augen und Pausbacken verfügen Pinguine über jene gewisse Kombination von Körpermerkmalen, die beim Menschen positive Gefühlstönungen auszulösen pflegt. Dies dokumentieren unzählige Plüschtiere, Cartoons und Werbespots. Die meisten Menschen mögen Pinguine, doch nur die wenigsten ahnen etwas von ihrer faszinierenden Lebenswelt. Diese Wissenslücke will Boris Culik, Biologe am Institut für Meereskunde in Kiel, mit seinem prachtvollen Bildband schließen.

Culik studiert seit über zwanzig Jahren das Leben der »Spezialisten fürs Kalte«. Sein Buch macht den Leser zum Begleiter seiner oftmals abenteuerlichen Reisen auf die Südhalbkugel – zum Rand der Atacamawüste Chiles, auf das ewige Eis der Antarktis oder zu den subantarktischen Inseln.

Der Autor stellt alle 17 Arten der sechs Pinguingattungen vor, vermittelt in launigem Plauderton den neuesten Stand der Forschung und geht auf alle denkbaren Fragen ein. Er berichtet, wie die ersten Pinguine für die Wissenschaft entdeckt wurden und wie sie zu ihrem Namen kamen, wie sie sich orientieren, wie alt sie werden, wie sie sich untereinander verständigen, putzen, paaren oder streiten, wie sie auf Nahrungssuche gehen oder auch selbst zur Beute werden. Zudem geht er sowohl auf die Bedrohungen durch Überfischung und Verschmutzung der Meere ein als auch auf die Bemühungen zum Schutz der Pinguinbestände.

Die Fähigkeiten der Vögel im Frack erregen immer wieder aufs Neue das Staunen der Wissenschaftler. So verringern ein spindelförmiger Körperbau und spezielle Befiederung beim Schwimmen den Strömungswiderstand effizienter als alles, was unsere Technik auf diesem Sektor zu bieten hat. Zudem sind Pinguine außergewöhnlich gute Taucher. Den absoluten Rekord hält ein 27 Kilogramm schwerer Kaiserpinguin, der bei einem 15,8-minütigen Tauchgang nachweislich eine Tauchtiefe von 534 Metern erreichte.

Von allen warmblütigen Tieren der Erde können Pinguine die niedrigsten Außentemperaturen ertragen. Beim Brüten während des antarktischen Winters trotzen Kaiserpinguine Temperaturen von bis zu –40 Grad Celsius und Schneestürmen mit Geschwindigkeiten von bis zu 200 Stundenkilometer. Die »gefühlte Temperatur« kann im Extremfall auf –180 Grad Celsius absinken – Verhältnisse, unter denen etwa eine ungeschützte menschliche Hautstelle binnen vierzig Sekunden gefrieren würde.

Die Mühen und Freuden der Freilandforschung vermag der Autor durch eine Vielzahl von kleinen Begebenheiten unterhaltsam zu schildern. Culik ist touristenfreundlich, indem er die Frage be-

Laut piepsend verlangt das Küken nach Nahrung. Die Zeit ist knapp, und groß wird nur, wer andauernd gefüttert wird.

Strickpullover der Größe XXS halten warm und verhindern, dass das Küken bei dem Versuch, sich mit dem Schnabel zu putzen, giftiges Öl schluckt.

antwortet, wo man Pinguine am besten beobachten kann, und pinguinfreundlich, weil er dem Touristen verrät, wie man sich in der Nähe der Frackvögel richtig verhält.

Culiks Beschreibungen sind somit weitaus mehr als nur Begleittexte für die wunderbaren, zum Teil doppelseitigen Fotos. Viele ausdrucksstarke Bilder fesseln den Betrachter durch ihre Schönheit oder ihre besondere Botschaft: etwa jene bizarre Eisscholle im Licht des antarktischen Sommers, auf der sich einige Duzend Adéliepinguine zur Rast versammelt haben. Oder jener ölverschmutzte Zwergpinguin, dem Helfer das Leben retten, indem sie ihm nach dem Säubern einen wärmenden Strickpulli überziehen (Bild links).

Kleine Unstimmigkeiten und Widersprüche können nicht beeinträchtigen, was dieses Buch so empfehlenswert macht: die vielen authentischen Begegnungen mit den »sympathischen Vögeln im Frack«.

Reinhard Lassek

Der Rezensent ist promovierter Biologe und arbeitet als freier Journalist in Celle.

ALLGEMEINWISSEN

Encyclopædia Britannica 2003

Encyclopædia Britannica Inc., Chicago 2003.
Zu beziehen über den Akademischen Lexikadienst, Münster (Westfalen).
32 Bände, 32000 Seiten, € 1780,–. Digitale Ausgabe: 2 CD-Rom € 99,–,
erweiterte Version (»Ultimate Reference Suite«) auf 4 CD-Rom oder DVD € 119,–

Mehr als zweihundert Jahre lang stellte der Star unter den Nachschlagewerken, die Encyclopædia Britannica, sich selbst als echt britischen Luxusartikel dar, obgleich sie schon seit den 1930er Jahren in Chicago produziert wird. Nicht nur die edle Ausstattung der Bände selbst beeindruckte den Kunden; auch der persönliche Besuch eines Lexikonvertreters vermittelte das Gefühl, hier einen besonderen Kauf zu tätigen. Der stolze Preis passte in diesen Rahmen: Schon die bescheidenste Ausgabe des Prachtwerks kostete über 3000 DM.

Dann kam das Internet, und alles wurde anders. In Gestalt der Microsoft Encarta trat 1992 ein großmächtiger Konkurrent mit niedrigen Preisen auf. Sie konnte zwar die Qualität der ehrwürdigen »Britannica« nicht erreichen; doch wie in anderen Fällen siegte Masse über Klasse. 1996 hatten sich die Verkaufszahlen der »Britannica« halbiert, auch die Produktion einer eigenen CD-Rom-Version konnte die Talfahrt nicht mehr aufhalten. Sie endete noch im selben Jahr mit dem Verkauf des Traditionsunternehmens an einen Schweizer Investor.

Für Computer- und Internetfans folgte eine Ära der Freude: Die neuen Eigentümer passten sich dem Trend der Zeit an und gaben den Verkauf über Vertreter zu Gunsten der digitalen Version auf. Wer zu diesem Zeitpunkt die Britannica erwerben wollte, mußte sich mit einer Scheibe zufrieden geben oder den Weg ins World Wide Web gehen. Im Internet waren die Artikel zunächst sogar umsonst zu haben.

Heute werden drei verschiedene CD-Rom-/DVD-Versionen angeboten, und die Website der Encyclopædia Britannica ist allseits bekannt und beliebt – allerdings nicht mehr kostenlos zugänglich. Wer mehr als Appetithäppchen will, muss sich auf ein Abonnement einlassen. Dieses ist schnell und einfach abgeschlossen; die Kundenfreundlichkeit der Site und ihrer Betreiber ist durchaus bemerkenswert.

Nachdem die Entwicklung der elektronischen Britannica schon so weit vorangetrieben war, gab der Verlag 2002 wieder eine neue Devise aus: »Back to the roots«. Nach vier Jahren rein digitaler Vermarktung kommt eine überarbeitete Neuauflage in gedruckter Form auf den Markt. Nun kann der geneigte Leser sich wieder am Anblick von fast anderthalb Metern Buch erfreuen und trotzdem auf dem letzten Stand sein – zumindest kurzfristig. In der Darstellung des deutschen Vertreibers sind gar die CD-Rom-Versionen nur noch eine »Ergänzung« zum »repräsentativen gedruckten Erzeugnis«.

Was kann einen deutschen Leser bewegen, sich der Sprachhürde zum Trotz für die Encyclopædia Britannica zu entscheiden – egal ob digital oder gedruckt?

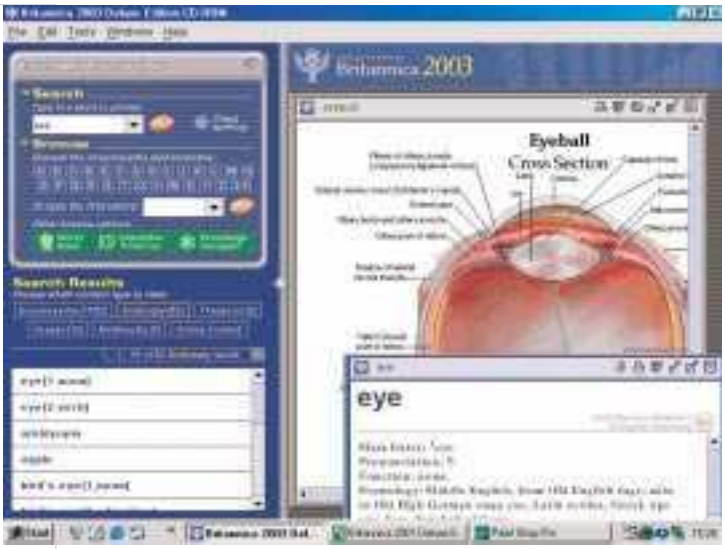
Der Umfang ist in der Tat beeindruckend. Allein der zwölfbändige erste Teil, die »Micropædia«, enthält bereits die Stichwortartikel eines kompletten Lexikons. Das richtig tief gehende Wissen (»Knowledge in Depth«) steht in der 17 Bände umfassenden »Macropædia«. Auf durchschnittlich zwanzig, gelegentlich bis zu 300 Seiten findet der Leser eine Art Überblicksvorlesung zu Themen wie »Telekommunikation«, »Algebra« oder »Die Schweiz«. So wird der Nachschlagende

»Back to the roots«: Die »Britannica« gibt es wieder auf Papier

im besten Sinne zum Studierenden. Insgesamt kommen über 65000 Artikel mit mehr als 24000 Fotos, Karten und Illustrationen zusammen.

Zur Erschließung dieser Fülle gibt es einen zweibändigen Index der Luxusklasse: mit 700000 Einträgen, die zum Stichwort nicht nur Band und Seitenzahl, sondern auch die Spalte und die – obere oder untere – Spaltenhälfte nennen.

Der pädagogische Anspruch des Werkes zeigt sich am deutlichsten im »nullten ▷



Die digitale Version des Gesamtwerks bietet zu einem Stichwort wie »Auge« nicht nur die Artikel und Abbildungen des Lexikons, sondern auch entsprechende Einträge aus »Merriam-Webster's Collegiate Dictionary« sowie zahlreiche Webhinweise. Die Version von 2001 enthielt noch mehr Funktionen und eine bessere Benutzerführung.

▷ Band«, der »Propædia« oder »Outline of Knowledge«. Es handelt sich um nichts weniger als den Versuch, die Gesamtheit des menschlichen Wissens säuberlich in zehn große Schubladen zu sortieren, die wieder in Unter- und Unterunterschubladen (*divisions* und *sections*) eingeteilt sind. Eine *division* des großen Wissensgebiets »Human Life« ist zum Beispiel »Stages in the Development of Human Life« mit den sections »Human Evolution« und »Human Heredity«. Letztere enthalten Empfehlungen zum Weiterlesen in Micro- und Macropædia.

Wie sieht es mit Aktualität und Detailreichtum des gedruckten Werkes aus? Zumindest dem Kandidaten von »Wer wird Millionär?«, der bei der Frage nach dem zweiten Vornamen der »Harry Potter«-Autorin Joanne K. Rowling sehr ins Schwitzen geriet, hätte das Werk geholfen. Die Dame heißt »Kathleen«. Joschka Fischer wird mit einer ausführlichen Biografie gewürdigt. Diese bekommt allerdings nicht jeder Besitzer des Werkes zu Gesicht: Sie befindet sich in einem der jedes Jahr zusätzlich aufgelegten Bände »Britannica Book of the Year« – in diesem Fall von 1996. Für den Hauptteil ist unser Außenminister offensichtlich noch nicht lange genug im Geschäft.

Schwieriger wird es, wenn schon die Frage nicht ganz klar ist: »Apropos Alarmanlagen. War da nicht irgendwann einmal etwas mit Gänsen, die einen Überfall verhinderten?« Unter welchem Stichwort sollte man da schauen? Gänse? Historische Überfälle? Hier hilft die elektronische Version, die schon auf die Suchbegriffe »geese« und »warning system« die Geschichte vom nächtlichen Überfall der Gallier auf Rom im Jahre 390 v. Chr. liefert.

Die Begeisterung über den Erfolg darf sich aber in Grenzen halten. Die Internet-Suchmaschine Google findet die Gänsegeschichte genauso schnell, sogar in wesentlich ausführlicherer Form, desgleichen den zweiten Vornamen von Frau Rowling. Und über Joschka Fischer findet man auf dessen eigener Website noch einiges mehr als nur seine Biografie.

Macht also eine gute Suchmaschine das ganze Lexikon entbehrlich? Ich glaube nicht. Die Encyclopædia beantwortet doch noch mehr Fragen als das Internet. Vor allem aber kann man den Antworten in (fast) jeder Hinsicht vertrauen.

Für Recherchezwecke ist die gedruckte Form der »Britannica« der digitalen eindeutig unterlegen. Letztere wird immerhin vierteljährlich aktualisiert; außerdem bietet sie vielfältige Suchstrategien, zusätzliche Bilder, Videos, Animationen, den Online-Zugriff auf mehrere tausend Zeitschriftenartikel, Videoclips und Verweise auf Zigtausende von Websites, die eigens von den »Britannica«-Redakteuren ausgewählt wurden.

Ist es also reine Nostalgie – vielleicht sogar Snobismus –, sich die Prachtbände ins Regal zu stellen? Vielleicht mag es ja Leute geben, die ganze Kapitel am Bildschirm lesen oder sich ausdrucken. Wenn es um Lernvergnügen und nicht nur um kurze Fakteninformation geht, dann ist für mich ein Buch in den meisten Fällen die bessere Wahl. Durch die pädagogische Sorgfalt der Redakteure fühlt sich der Leser eingeladen, sich einen Überblick über ganze Gebiete zu verschaffen und nicht nur schnelles Wissen abzugreifen. Wo ein Kapitel bis zu 300 Seiten lang sein kann, da ist die Buchform sehr willkommen. Und ganz ehrlich – ein bisschen Tradition und Nostalgie schadet nicht.

Die Herausgeber pflegen diese Tradition auf besondere Weise. Unter http://www.1911encyclopedia.org ist die Originalausgabe der »Britannica« von 1911 abzurufen – kostenlos.

Elke Reinecke

Die Rezensentin ist Redakteurin bei Wissenschaft Online in Heidelberg.

MEDIZIN

Richard Preston

Superpox

Tödliche Viren aus den Geheimlabors

Ein Tatsachen-Thriller

Aus dem Amerikanischen von Birgit Brandau und Hartmut Schickert.
Econ, München 2003. 368 Seiten, € 24,–

Die Probe aus dem Postfach erwies sich als voll mit Milzbrandsporen. Man strich sie über eine Petrischale mit Blutagar und am späten Nachmittag wucherten auf dem Nährboden ganze Kolonien von Milzbranderregern. Die Flecken waren von blassem Blau und funkelten wie pulverisiertes Glas: der klassische, glitzernde Anblick von Anthrax.« So sachlich kühl leitet Richard Preston sein neues Buch ein, einen Thriller der besonderen Art, der alle Voraussetzungen für eine weitere Hollywood-Verfilmung à la »Hot Zone« bietet.

Was nüchtern mit der Beschreibung des ersten Milzbrand-Anschlags in den USA im Herbst 2001 beginnt, wird schnell zu einem Wissenschaftskrimi, der den Leser von der ersten Zeile an in den Bann schlägt. Von Anthrax geht es über die Pocken zu den geheimen Biowaffenprogrammen der Sowjetunion und der USA und zurück zu den mysteriösen, bis heute nicht aufgeklärten Anthrax-Briefen

im Herbst vor zwei Jahren. Preston schildert Unfälle in Hochsicherheitslabors und Divergenzen zwischen dem FBI, der CIA und militärischen Institutionen so detailliert, als wäre er selbst dabei gewesen.

En passant lässt der Autor noch einmal die letzte Pockenepidemie in Europa im Jahr 1969 vor den Augen des Lesers ablaufen. Im sauerländischen Meschede erkrankten damals zwanzig Menschen, von denen vier starben, und die Einwohner des kleinen Städtchens wurden zu Parias der Nation: Wer ein Auto mit dem Kennzeichen MES fuhr, wurde an Tankstellen nicht mehr bedient.

Mit der ihm eigenen Detailversessenheit beschreibt der Wissenschaftsjournalist alles über Pocken, Pest, Anthrax und so weiter, was heutige Infektionsmediziner hofften vergessen zu können. Von *Variola minor*, *major*, *discreta* und *confluens*

Sowjetische Biowaffen sind der Kontrolle ihrer Hersteller entglitten

ist zu lesen, von Affen-, Stinktier- und Insektenpocken, vom »Zytokinsturm«, der den charakteristischen Pockengeruch verursacht, und von dem zwanghaft panischen Gesichtsausdruck der Pockenkranken, der durch die fortschreitende Zerstörung der Gesichtshaut verursacht wird. Noch einmal erlebt der Leser jene höchst dramatischen Momente des internationalen Programms, mit dem die Weltgesundheitsorganisation (WHO) die Ausrottung der Pocken vorantrieb. So stand 1975 der Erfolg auf Messers Schneide, weil in Bangladesch fast gleichzeitig 1200 Ausbrüche in unterschiedlichen Landesteilen bekämpft werden mussten.

Mit dem letzten Pockenfall in Somalia im Jahr 1977 ist die Geschichte der »Mutter aller Seuchen« noch lange nicht am Ende. Noch bis in die Tage von Gorbatschow stellte die Sowjetunion in ihrem geheimen »Biopreparat«-Programm Pockenviren nicht nur kilo-, sondern tonnenweise her. Man versuchte, die Erreger »heiß zu machen«, das heißt genetisch so zu verändern, dass eine Pockenimpfung wirkungslos blieb. Gleichzeitig war das sowjetische Gesundheitsministerium der größte Gönner der WHO-Kampagne und stiftete mehr Impfstoff als alle anderen Länder zusammen.

Preston weiß auch zu berichten, vermutlich durch Aussagen von Überläufern wie dem Mikrobiologen Kanatjan Ali- ▷

SCIENCE AND FUN

LEUCHTE »ADUKI«

Die Leuchte »Aduki« spendet ein angenehmes Licht. In einem Zyklus von 30 Sekunden wechselt das Licht von blau zu violett und rot. Die Lampe kann jederzeit auf eine konstante Lichtfarbe eingestellt werden. Mit dem Ladegerät lässt sie sich aufladen und leuchtet so 4 – 6 Stunden. Maße: ca. 130 × 90 × 50 mm, mit Netzgerät; € 59,–.

PHRENOLOGISCHER KOPF

Der phrenologische Kopf war Bestandteil jeder Arztpraxis des 19. Jahrhunderts. Damals wurden allen menschlichen Fähigkeiten (Faculties) ganz bestimmte Regionen des Gehirns zugeordnet und man unterschied zwischen 48 verschiedenen Faculties, wie Intellekt, Moral, Liebe und vielen anderen, die in der heutigen Zeit gar nicht mehr geläufig sind. Maße: 14 × 16,5 × 29 cm; Replik aus Chinaporzellan; € 49,–.

WINDRAD »REGENBOGEN«

Das Windrad »Regenbogen« hat einen Rotor mit 3 Flügeln aus extrem witterungsfestem SolarMax-Segeltuch. Der Bodenanker ist aus Stahlrohr, der Mast aus eloxiertem Aluminium. Der Winddruck wird bei hohen Geschwindigkeiten aus den Segeln genommen, da die Abspannung zwischen den Rotorblättern elastisch ist. Weil das Windrad «Regenbogen« sich immer über einer Körperhöhe von 2 Metern dreht, ist es für Kinder und Erwachsene gleichermaßen sicher. Maße: Höhe 3 m, Rotor: 2 m Ø, 2 kg schwer, mit Gebrauchsanweisung; € 76,50.

GYROTWISTER »CLASSIC«

Der Gyrotwister besitzt im Inneren einen Rotor, der Fliehkräfte bis zu 15 kg aufbaut. Damit trainieren Sie nicht nur Arme und Handgelenke, sondern Sie bauen auch Ihre Greifkraft und Koordinierungsfähigkeit aus. Maße: ca. 70 × 70 × 55 mm, Version blaugelb, bis zu 10 000 Umdrehungen pro Minute; € 19,–.

GEOMAG 130

Mit den 90 Stangen (Farbe: blau) und 40 Kugeln des Baukastens »Geomag« lassen sich viele Figuren konstruieren; € 64,–.

TAUMELKREISEL

Für Fans des Wendekreisels kommt hier die neue Herausforderung: 1 Kreisel – 2 Formen – 2 Bewegungen. Je nachdem wie Sie die beiden Hälften zusammenstecken und verdrehen, ergeben sie einen herkömmlichen oder einen Taumelkreisel (Oloid). Verschenken Sie nur die eine Hälfte und machen Sie Ihr Gegenüber neugierig auf ein Wiedersehen. Der Taumelkreisel ist aus Aluminium gefertigt, in grau eloxiert und wird in einer Verpackung aus Zellkautschuk geliefert. Maße: Durchmesser 45 mm, Höhe 45 mm; € 22,–.

@ Bestellinformationen finden Sie unter:
www.spektrum.de

MAGNET-SCHWEBEGLOBUS

Durch einen Magnetfeldsensor wird die Weltkugel in einem Schwebezustand gehalten. Farbe: silbermetallic-blau, Ø 100 mm, mit Netzstecker; € 39,–.

BRIEFBESCHWERER »EVOLUTION MENSCH«

Der Glasbogen-Briefbeschwerer »Evolution Mensch« zeigt humorvoll die Entwicklung des Menschen vom Primaten bis zum modernen Homo sapiens, der gebückt vor dem Computertisch sitzt. Die Abbildungen sind mittels modernster Lasertechnik dreidimensional in das Plexiglas eingearbeitet worden. Plexiglas; Maße: 140 × 35 × 70 mm; € 50,–.

DAMPFBALL »HERONSRING« EXKLUSIV FÜR ABONNENTEN

Der Kupferblechdampfkessel und die Kugel des Heronsringes sind zu einer Einheit zusammengefasst und mittels zweier Kugellager in einem Aluminiumring befestigt. An zwei gegenüberliegenden Punkten der Kugel sind Düsen angebracht, durch welche der Dampf ins Freie strömt, sodass eine Drehzahl von mehr als 3500 U/min erreicht werden kann. Alle Modelle sind in Handarbeit hergestellte Unikate und mit hochtemperaturbeständigem Einbrennlack beschichtet. Der Versand erfolgt in einer Holzkiste. Ringdurchmesser 100 mm, Kugeldurchmesser 40 mm. Verschlussdeckel mit Sicherheitsventil. Als technisches Spielzeug nicht für Kinder geeignet. Lieferung ohne Brennspiritus; € 125,– inkl. Versandkosten Inland.

Alle Preise verstehen sich inklusive Umsatzsteuer, zzgl. Versandkosten.

bekow, wie die sowjetischen Kampfstoffproduzenten amerikanische Inspekteure im riesigen Komplex ihrer Labors an der Nase herumführten – und in den Wirren der Auflösung der Sowjetunion selbst die Kontrolle über die ungeheuren Mengen biologischer Kampfstoffe verloren.

Der letzte Teil des Buches führt dann wieder in das aktuelle Zeitgeschehen. Die Ereignisse vom 11. September, die Vermutung der US-Regierung, bestimmte »Schurkenstaaten« seien die illegalen Erben des sowjetischen B-Waffenprogramms, sowie der in letzter Konsequenz daraus legitimierte Irak-Krieg machen klar, warum sich die USA nicht den mehrfachen Aufforderungen der Weltgesundheitsorganisation beugten, die letzten noch in Labors (einem amerikanischen und einem russischen) vorhandenen Pockenvorräte müssten ein für alle Mal vernichtet werden. Stattdessen wurden in militärischen Einrichtungen wie auch in den Centers for Disease Control die Forschungen am Variola-Virus auf ein nie gekanntes Maß hochgefahren und eine beispiellose Impfkampagne in Gang gesetzt.

Der Kreis schließt sich mit einer Analyse der Gefährlichkeit von mit Anthrax-Sporen beladenen »Briefbomben«. So heißt es über die Folgen des Briefes, der am 15. Oktober 2001 an den Senator Daschle geschickt wurde: »Geruchlos und unsichtbar in der Luft schwebend, wurden die Partikel aus dem Brief von der Hochleistungsklimaanlage des Gebäudes angesaugt. Vierzig Minuten lang verteilten Ventilatoren die Luft im gesamten Hart Senate Office Building, bis endlich jemand daran dachte, sie abzuschalten. Zu guter Letzt wurde das Gebäude für sechs Monate evakuiert, die Reinigung kostete 26 Millionen Dollar.«

Spannender kann man medizinische Mikrobiologie, Politik und Zeitgeschehen nicht miteinander verknüpfen. Große Klasse, Herr Preston!

Hermann Feldmeier

Der Rezensent ist Arzt für Mikrobiologie und Infektionsepidemiologie und Professor für Tropenmedizin an der Freien Universität Berlin.

PHYSIK

Frank Close

Luzifers Vermächtnis

Eine physikalische Schöpfungsgeschichte

Aus dem Englischen von Thomas Filk.
C. H. Beck, München 2002. 274 Seiten, € 22,90

Nein, das Buch ist nicht der Frage gewidmet, wie das Böse physikalisch in die Welt kam. Der Untertitel des englischen Originals »The Meaning of Asymmetry« drückt aus, worum es geht: um die Abweichungen von vollkommener Symmetrie, welche die Existenz einer Welt wie der unseren erst ermöglichen.

Wenn wir um uns blicken, ist Asymmetrie statt Symmetrie die selbstverständliche Regel. Triviale Asymmetrie der Art, dass mein Weinglas, während ich dies schreibe, links statt rechts von mir steht. Und dass es – dies nun nicht trivial – aus Materie statt Antimaterie besteht. Aber Asymmetrie allein ist nur ein uneinsehbares, belangloses Durcheinander. Erwähnenswert wird sie erst vor einem Hintergrund von erwarteter Symmetrie, wenn nämlich aus ihrem Sumpf Einsicht in die Symmetrie erwächst, die sie verletzt.

So ist das Buch zunächst einmal eines über Symmetrie und damit zu vergleichen mit einer Fülle von Büchern zu diesem Thema: Allein in meinem Besitz habe ich 35 Stück gezählt. Frank Close erwähnt im englischen Original gerade mal drei und einen Originalartikel. Das ist schade und auch nicht fair.

Im Gegensatz zu den meisten anderen Büchern zur Symmetrie, die ich kenne, versucht dieses gar nicht erst, Symmetrie oder ihre Abwesenheit sauber zu definieren, sondern begnügt sich mit etwas vagen Feststellungen zur Dreh-, Verschiebungs- und Spiegelsymmetrie. Unter anderem aus diesem Grund ist es besonders leicht und vergnüglich lesbar. Aber Close verschweigt konsequenterweise auch Wichtiges wie das Theorem von Emmy Noether mit seinem Kriterium für Symmetrie und deren Abwesenheit.

Ausführlich geht das Buch auf den Drehsinn von Molekülen – Rechts- oder Linkshändigkeit – sowie dessen Auswirkungen auf die Chemie des Lebens ein. Vor allem hier hätte man sich detailliertere Literaturhinweise gewünscht als nur ein 1979 erschienenes Buch von Martin Gardner, um etwaigen Zweifeln am Dargestellten nachgehen zu können.

Von den dreizehn Kapiteln des Buches handeln die ersten vier vor allem von Symmetrie und Symmetriebrechung in der Kunst, dem Wetter (der Coriolis-Kraft), der Chemie und dem Leben. Ihnen folgen vier Kapitel, welche den Leser in das physikalische Wissen einführen, das für die letzten fünf erforderlich ist. Mir haben die Kapitel 5 bis 7 besonders gut gefallen. Sie stellen in einem Stil, der sich von dem des übrigen Buches deutlich unterscheidet, die Entwicklung der Physik von der Entdeckung der Röntgenstrahlen 1895 bis zu der des Neutrons 1932 mit der Hilfe von Geschichten über die Protagonisten dar. Das achte Kapitel handelt von Symmetrie und Vereinheit-

Frank Close im Original (Mitte) und in zwei symmetrisierten Versionen: links die linke Gesichtshälfte zusammen mit deren Spiegelbild, rechts entsprechend für die rechte Hälfte.

▷ lichung der Kräfte in der Physik der Elementarteilchen.

Asymmetrien, Abweichungen insbesondere der Naturgesetze von ihren erwarteten Symmetrien, bilden das beherrschende Thema der letzten fünf Kapitel. Die spontane Symmetriebrechung, die Verletzung der Spiegelsymmetrie, das Higgs-Phänomen sowie das Verschwinden der Antimaterie im frühen Universum werden besonders klar und anschaulich dargestellt. Hier kann Close, auch mithilfe von Analogien aus der Festkörperphysik, Begeisterung für die Erforschung der Elementarteilchen erwecken.

Insgesamt ist das Buch leicht zu lesen, unterhaltend und charmant. Es vermittelt dem Leser lohnende, wenn auch gelegentlich nicht sehr präzise Einsichten in die Bedeutung von Symmetrie und Asymmetrie für das Leben, die Kunst und die Wissenschaften.

Henning Genz

Der Rezensent ist Professor für Physik mit dem Arbeitsgebiet »Theorie der Elementarteilchen« am Institut für Theoretische Teilchenphysik der Universität Karlsruhe.

AUßERIRDISCHES

Stephen Webb

If the Universe is Teeming with Aliens … Where Is Everybody?

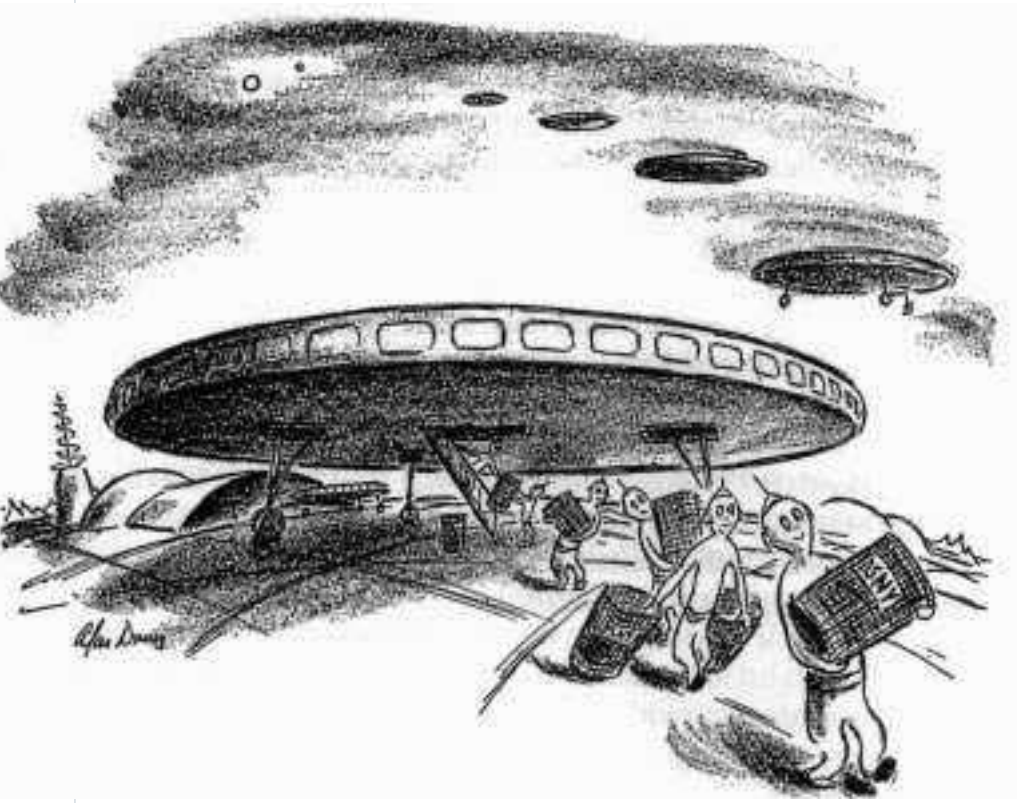
Fifty Solutions to the Fermi Paradox and the Problem of Extraterrestrial Life

Copernicus Books, New York 2002. 300 Seiten, $ 27,50

Ein Blick in den Nachthimmel genügt, und schon sind wir in den Klauen des Fermi-Paradoxons gelandet. Denn im selben Moment kommen uns zwei Einsichten, die einander eigentlich ausschließen: In einem schier unendlichen Universum mit Milliarden von Sterneninseln muss es fast zwangsläufig auch anderswo bewohnte Welten geben – doch nirgendwo entdecken wir auch nur eine Spur von außerirdischen Zivilisationen. »Where is everybody?«, fragte der Physik-Nobelpreisträger Enrico Fermi vor über fünfzig Jahren: Wenn es sie gibt, wo sind sie dann alle?

Kreative Lösungsvorschläge für das Paradoxon gibt es zuhauf: Wir sind die erste Zivilisation, die so hoch entwickelt ist, wir suchen auf den falschen Frequenzen, wir sind alle Aliens, denn die ersten organischen Sporen gelangten auf Meteoriten in unser Sonnensystem. Auch folgende Variante wurde bereits mit einiger Ernsthaftigkeit vorgetragen: Der Nachthimmel ist in Wirklichkeit ein riesiges Planetarium, das uns vorgaukeln soll, es gebe kein Leben im Universum.

Aus Gründen, die nur sie selbst verstehen, kehren Außerirdische mit Abfalleimern der Stadtverwaltung von New York auf ihren Heimatplaneten zurück.



Der Physiker Stephen Webb, den das Thema schon fast zwanzig Jahre lang umtreibt, hat all diese Vorschläge, ob sie nun von Wissenschaftlern, Science-Fiction-Autoren oder Tischnachbarn in der Kneipe um die Ecke stammten, zusammengetragen, sortiert und höchst kenntnisreich kommentiert. Fünfzig kleine, allgemein verständliche Abhandlungen zur Lösung des Fermi-Paradoxons sind so zusammengekommen, eingeteilt in drei Kategorien: »Sie« sind oder waren längst hier, »sie« haben noch nicht mit uns kommuniziert, es gibt »sie« nicht.

Klug und unterhaltsam geschrieben, ist das Buch nicht zu einer bloßen Auflistung geraten, sondern zu einem Netz an Querverweisen und aufeinander aufbauenden Lösungsvarianten. Auch noch so gewagte Spekulationen werden mit kritischer Distanz daraufhin untersucht, ob ihnen nicht doch eine vernünftige Idee zu Grunde liegt. So liest sich selbst die Diskussion der Planetariumshypothese als informatives Lehrstück: Welche Art von Zivilisation wäre in der Lage, ein solches Planetarium zu errichten, und wie lässt sich seine Existenz mithilfe unseres naturwissenschaftlichen Paradigmas widerlegen? Wenn die Lösung des Fermi-Paradoxons gegen Ende der Lektüre in weitere Ferne gerückt zu sein scheint, als dies noch beim ersten Aufschlagen des Buches der Fall war, dann hat der Leser immerhin die außergewöhnliche Tragweite dieses kosmischen Rätsels kennen gelernt.

Thilo Körkel

Der Rezensent ist Diplomphysiker und Wissenschaftsjournalist in Frankfurt am Main.

SCIENCE-FICTION

Tobias Daniel Wabbel (Hg.)

S.E.T.I.

Die Suche nach dem Außerirdischen

Englische Texte übersetzt von Andrea Schröder.
Beust, München 2002. 302 Seiten, € 21,90

Furcht erregende Aliens oder kosmische Brüder? Sind die Außerirdischen skrupellose Eroberer neuer Welten oder friedliche, ethisch hoch entwickelte Nachbarn, die uns an ihrem überlegenen Wissen teilhaben lassen wollen? Senden sie Funkbotschaften auf der 21-cm-Linie des Wasserstoffs oder reisen sie in riesigen Raumschiffen an und lassen sich durch Wurmlöcher in Raum und Zeit fallen? Vielleicht spionieren sie schon jetzt mit kleinen Robotsonden in unserem Sonnensystem. Oder aber: Es gibt sie gar nicht, und Leben ist nur ein unwiederholbarer kosmischer Zufall.

In diesem Buch sind über zwanzig Essays und Kurzgeschichten meist namhafter Autoren versammelt. Naturwissenschaftler und Science-Fiction-Schriftsteller, vom Astrophysiker Stephen W. Hawking über den Astronauten Ulrich Walter bis hin zu Arthur C. Clarke, Autor des Klassikers »2001 – Odyssee im Weltraum«, stellen Vermutungen über Fragen an, die, obwohl zum Teil bereits in der Antike gestellt, immer noch unbeantwortet sind.

Noch im Jahr 1835 ließen sich die Leser der »New York Sun« von Berichten über freundliche, engelhafte Fledermausmenschen narren, die ein neu entwickeltes Teleskop auf dem Mond entdeckt habe. Doch 1922 wurde es ernst: Guglielmo Marconi, Nobelpreisträger für seine Pionierarbeit zur Übertragung von Radiowellen, versuchte als Erster, Radiosignale einer Zivilisation auf dem Mars aufzufangen. Die moderne Suche nach außerirdischer Intelligenz (*search for extraterrestrial intelligence*, Seti) begann 1959, als der Astronom Frank Drake ein Radioteleskop auf die rund zehn Lichtjahre entfernten Sterne Tau Ceti und Epsilon Eridani ausrichtete. Das 1984 gegründete und zunächst mit Nasa-Geldern finanzierte Seti-Institut in Kalifornien widmet sich seit 1994 mithilfe privaten Kapitals der Suche nach Außerirdischen (Spektrum der Wissenschaft 1/2002, S. 109).

Das Ergebnis ist bekannt: Der Kosmos produziert, soweit wir wissen, auf allen Wellenlängen nur natürliches Rauschen. Lediglich der ein oder andere Fehlalarm, ausgelöst durch regelmäßige Signale von Quasaren oder vorbeifliegenden Flugzeugen, brachte die Forscherherzen kurzzeitig aus dem Rhythmus. Ein einziges kosmisches Signal aus dem Sternbild Schütze von wenigen Sekunden Dauer scheint nichtnatürlichen Ursprungs gewesen zu sein. Aufgezeichnet im August 1977, wurde es nie wieder empfangen und ist bis heute ungeklärt.

Was also bringt Wabbels Buch Neues zum Thema? Leider nichts. Die Autoren tauschen, wenn auch teilweise in Exklusivbeiträgen, altbekannte Argumente aus. Warum zum Beispiel haben uns noch keine Außerirdischen aufgesucht? Weil die Gesetze der Physik die Überwindung der Raumzeit verbieten, weil die Außerirdischen kein Interesse an unserer wenig entwickelten Rasse haben, weil es sie überhaupt nicht gibt. Oder weil das Zeitfenster für die Kontaktaufnahme zu kurz ist, denn jede fortgeschrittene technologische Zivilisation sprengt sich, kaum hat sie das Radio erfunden, selbst in die Luft.

Den Beiträgen fehlt die Aktualität. Die reichen Wasserfunde überall im Kosmos, Grundvoraussetzung für die Entstehung von Leben, wären einer Erwähnung ebenso wert gewesen wie die Entwicklung neuer Teleskope, mit denen wir den Außerirdischen näher auf den Leib rücken können. Auch die Genforschung, die zur zentralen Frage Auskunft geben kann, mit welcher Wahrscheinlichkeit Leben irgendwo im All überhaupt entstehen kann, bleibt praktisch außen vor. Dankenswert immerhin eine kleine Einführung in die Statistik sehr seltener Ereignisse wie eben der Entstehung von Leben: Sie hilft, die überwältigende Komplexität des Problems besser zu erfassen.

Viel Unfug und manche haarsträubende Einlassung hat Eingang in das Buch gefunden. Stephen Hawking fordert unwidersprochen, die Menschheit müsse ihre Nachkommenschaft endlich auf breiter Front mit gentechnischen ▷

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online

W.-C. Dullo und Geologische Vereinigung (Hg.)

Milestones in Geosciences

Selected Benchmark Papers Published in the Journal »Geologische Rundschau«

Springer, Heidelberg 2003, 120 Seiten, € 26,70

Mit diesem Buch möchte die Geologische Vereinigung zum Jahr der Geowissenschaften 2002 herausragenden Wissenschaftlern wie etwa Alfred Wegener Tribut zollen, die in diesem Fach Meilensteine gesetzt haben.

Neben der englischen Übersetzung sind auch die zumeist auf Deutsch erschienenen Originalartikel abgedruckt. Sie vermitteln einen interessanten Einblick in den Stil wissenschaftlicher Abhandlungen aus dem frühen 20. Jahrhundert.

Aufgrund der wissenschaftlichen Ausdrucksweise ist dieses »historische Fachbuch« für den Laien eher ungeeignet, für jeden Geowissenschaftler aber ein echter Leckerbissen!

Aus der Rezension von Gudrun Massmann

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■ ■ ■ ■ ■
Didaktik	■ ■ ■
Suchen/Finden	■ ■ ■
Lesespaß	■ ■ ■ ■ ■
Preis/Leistung	■ ■ ■ ■
Gesamtpunktzahl	20

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter
http://www.wissenschaft-online.de/5x5

▷ Korrekturen veredeln. Zeitverschwendung sei es, darauf zu warten, dass uns die Darwin'sche Evolution intelligenter und gutwilliger mache. Auch der Vision des Astronomie-Professors Joseph Silk ließe sich einiges entgegensetzen: Keinem machtvolleren Zweck könne die Forschung dienen, als das Gewebe von Raum und Zeit auseinander zu reißen.

Dem Herausgeber selbst, einem dreißig Jahre alten Seti- und Science-Fiction-Fan, entgleitet die Einleitung, wenn er in fehlgegangener Ironie über die angemessene Gestaltung des Erstkontakts sinniert (»Draufhauen: ja oder nein?«). Seiner kruden Kurzgeschichte, in der ein »Playboy«-lesender Bischof und päpstlicher Privatsekretär unheilige Drohworte gegen heranrückende galaktische Armeen ausstößt, folgt zum Ausgleich ein theologischer Essay eines Professors der päpstlichen Universität Rom. Die Außerirdischen seien vermutlich der Erbsünde unterworfen, nicht aber einem Heilsversprechen. Der christliche Glaube sei jedoch problemlos mit der Existenz von Außerirdischen vereinbar, die katholische Kirche nehme bezüglich dieses Punkts zurzeit eine abwartende Haltung ein.

Einige Texte immerhin sind der Lektüre wert. Brian Aldiss, ehemaliger Buchhändler und Autor der Drehbuchvorlage für Steven Spielbergs »Artificial Intelligence«, erinnert an den uralten und stets enttäuschten Drang der Menschen, im Unbekannten das Göttliche zu suchen. Und Allen M. Steele liefert statt eines Sittenbildes kleiner grüner Männchen lieber eine Analyse der modernen Gesellschaft. Die Nachricht vom ersten Kontakt mit außerirdischen Intelligenzen würde, so prophezeit er, die gesamte Menschheit erstarren lassen. »Und dieses Gefühl würde ungefähr fünf Minuten lang anhalten. Vielleicht zehn, wenn nichts anderes geschieht. Fünfzehn, wenn die Botschaft von Elvis Presley unterschrieben wäre.«

Thilo Körkel

KUNST

Doris Schattschneider und Michele Emmer (Hg.)

M. C. Escher's Legacy

A Centennial Celebration

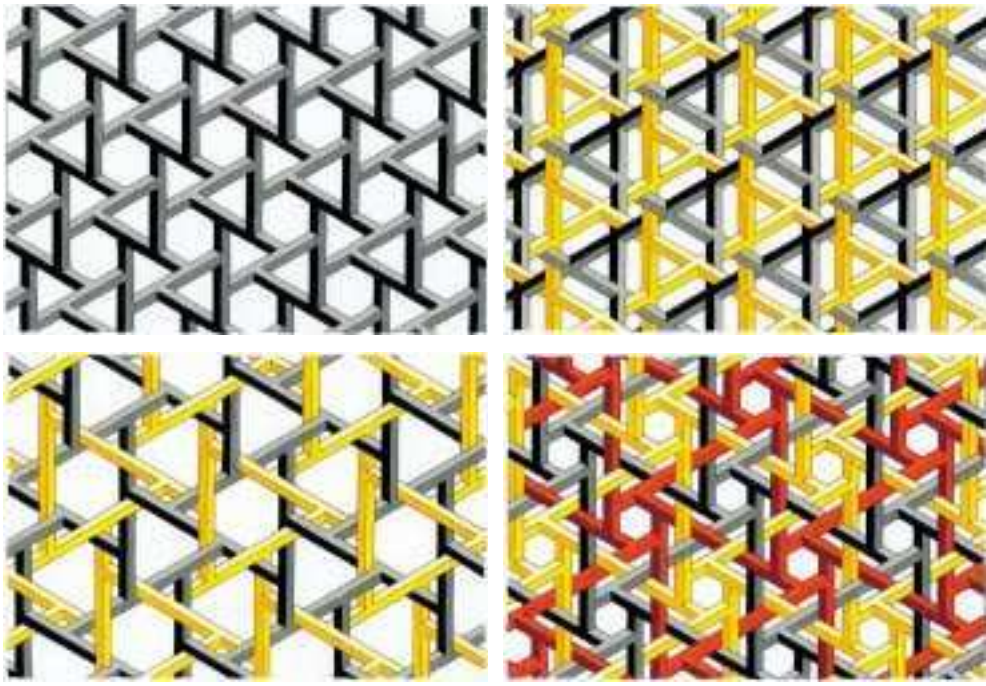
Springer, Berlin 2003. 474 Seiten, mit CD-Rom, € 90,90

Die Kunstkritiker mögen ihn nicht, das Publikum dafür umso mehr: den niederländischen Künstler Maurits C. Escher (1898–1972). Seine Rollwürmer, die auf dem Möbiusband kriechenden Ameisen und die dicht an dicht die Fläche füllenden Eidechsen und Vögel sind weltberühmt geworden. Die Mathematiker haben einen besonderen Anlass, ihn zu mögen, denn so kunstvoll wie in den Holzschnitten seiner Serie »Kreislimit« ist die hyperbolische (nichteuklidische) Ebene noch nie gepflastert worden. Escher hat in seinen Werken Anregungen der namhaften Mathematiker Roger Penrose und H. S. M. Coxeter aufgegriffen.

Das vorliegende Buch vereinigt reichlich vierzig Beiträge zu einer Gedächtniskonferenz aus Anlass seines hundertsten Geburtstages 1998. Es ist wenig verwunderlich, dass die Autoren Künstler, Mathematiker oder beides zugleich sind. Der Chemiker István Hargittai hat sich durch seine Bücher über Symmetrie zum Ehrenmathematiker qualifiziert, und Douglas R. Hofstadter, der Kurt Gödel, Johann Sebastian Bach und den Jubilar zu Helden seines Kultbuches gemacht hat, ist sowieso eine Klasse für sich.

Man kennt sich, tauscht Erinnerungen aus, zum Beispiel von der Vorgängertagung 1985 am selben Ort zum selben Thema oder von persönlichen Begegnungen mit Escher, wie auf einem netten Familientreffen. Interessanter wird das Buch, wenn man diesen Teil hinter sich gelassen hat. Mehrere Künstler haben Eschers Ideen aufgegriffen und weiterentwickelt, mit zum Teil bemerkenswerten Ergebnissen. Häufig sind die ohnehin nach mathematischen Prinzipien konstruierten Bilder mit Computerhilfe hergestellt; da ist die beiliegende CD-Rom ein geeignetes Transportmittel für die Grafiken, die in dieser Menge nie in ein (bezahlbares) gedrucktes Buch gepasst hätten.

Rinus Roelofs hat aus regelmäßigen Parkettierungen, die schon Escher zu seinen *regelmatige vlakverdelingen* inspirierten, Bilder von Stangenkonstruktionen gemacht, die das räumliche Vorstellungsvermögen des Betrachters bis an seine Grenzen fordern – und gelegentlich darüber hinaus, denn manche Bilder bestehen aus lauter »unmöglichen Figuren»:



Rinus Roelofs hat seine unmöglichen Stangenkonstruktionen nach dem Vorbild von Eschers »regelmäßigen Flächenaufteilungen« geschaffen.

Im Kleinen ist alles plausibel, aber insgesamt passt es nicht zusammen.

Valentin Vulihman und Richard A. Termes bedecken statt der Ebene die Oberfläche einer Kugel mit Escher-artigen Mustern. Douglas Dunham produziert neue »Kreislimits«, indem er die hyperbolische Ebene mit etwas anders geformten Fischen bepflastert. Robert Fathauer und Peter Raedschelders verbinden die Kunst der Escher'schen Flächenaufteilung mit der fraktalen Geometrie.

Das sind alles sehr interessante Ansätze. Aber dann ist in dem Buch ein echter Escher neben den neuen Werken zu sehen, und mein Kunstbanausen-Auge sagt auf der Stelle: »Der Alte konnte es doch besser!« Ist es reine Gewohnheit, dass mir die viel gesehenen Werke besser gefallen als die nachgemachten?

Einige Beiträge des Buches bringen neue Gedanken zu der Frage, warum das allgemeine Publikum (mich eingeschlos-

Eschers Werke sind erregungslos bis zur Betulichkeit

sen) und die offizielle Kunstkritik in ihrer Bewertung Eschers so auseinander liegen. Eschers Werke sind erregungslos bis zur Betulichkeit und ordentlich bis zur Pedanterie. Ein Reptil entsteigt seinem Flächenaufteilungs-Käfig, kriecht auf ein Buch, pafft ein Rauchwölkchen in die Luft und schleicht sich an einen anderen Platz im selben Käfig zurück – das war schon das höchste der Gefühle. Leidenschaft, Schmerz, »Zerrissenheit des modernen Menschen« und so weiter kommen einfach nicht vor. Die Figuren sitzen an dem Platz, den der sorgsam ausgearbeitete Plan des Bildes ihnen vorgibt, oder wandeln gemessenen Schrittes im Kreise, die einen ständig bergauf, die anderen ständig bergab.

Seelenruhe, geordnete Verhältnisse, die von starken Gefühlen unbehelligte Wachheit des Geistes: Das ist es, was Eschers Werke ausstrahlen und zugleich vom Betrachter einfordern, wenn man den vielen Wechseln der Perspektive, der Interpretation oder von Vorder- und Hintergrund folgen will. Offensichtlich gefällt mir das, und vielen anderen Leuten auch.

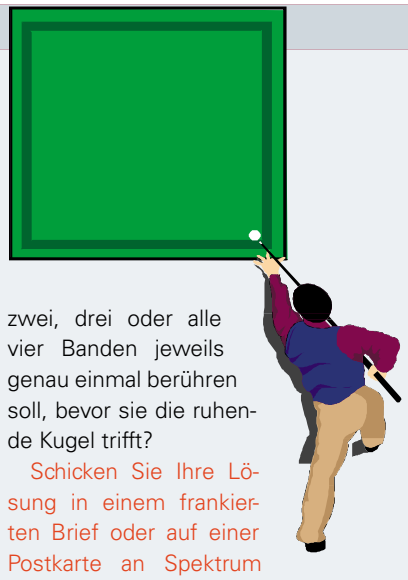
Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

PREISRÄTSEL

Billard

Von Pierre Tougne



Pauls Billardtisch und die zugehörigen Kugeln sind die Standardversion für theoretische Physiker. Der quadratische Tisch hat keine Löcher. Die Kugeln sind punktförmig und laufen geradlinig und reibungsfrei. Die Banden werfen die Kugeln nach dem Reflexionsgesetz »Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel« wieder zurück. Trifft eine Kugel genau eine der Ecken, so rollt sie entlang derselben Geraden zurück, auf der sie gekommen ist.

Paul legt eine Kugel in eine der Ecken und will eine zweite Kugel so auf den Tisch legen, dass er sie mit der ersten trifft, nachdem diese genau eine Bande berührt hat.

Auf wie viel Prozent der Tischfläche kann er die zweite Kugel legen, sodass dies gelingen kann?

Wie lautet die Antwort, wenn die angestoßene Kugel statt einer Bande zwei, drei oder alle vier Banden jeweils genau einmal berühren soll, bevor sie die ruhende Kugel trifft?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir fünf Würfelsets »Baumbestimmungswürfel«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 15. Juli 2003, eingehen.

Lösung zu »Zugkombinationen« (Mai 2003)

Folgende 30 Zugkombinationen lassen sich nicht zusammenstellen: 153(24); 253(14); 352(14); 42(135); 452(13); 513(24); 52(134); 53(124) und 542(13).

Bei allen genannten Kombination müssen zwischenzeitlich drei oder vier Loks im gelben Bereich warten, während eine Lok mit höherer Nummer über die rote Schleife an ihnen vorbeifährt. Keine eingeklemmte Lok auf dem gelben Gleis kann nun die nächste Lok sein, die sich im Ausgangsbereich anschließt.

Jürgen Bauman aus Köln erkannte, dass in der Aufgabe nirgends ausdrücklich untersagt wurde, dass sich die fünf Lokomotiven gleichzeitig und mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegen dürfen. Dadurch lassen sich viele der oben angeführten Kombinationen doch noch zusammenstellen. 15324 ist nur eine davon:

- Lok 1 fährt über gelb nach grün.
- Die Loks 2 und 3 fahren gemeinsam auf gelb und langsam weiter auf rot.
- Lok 4 fährt über gelb auf rot, holt dort den fahrenden Zug 32 ein und schließt sich ihm an.
- Lok 5 huscht schnell über gelb nach grün, wo danach der Bummelzug 324 endlich einfährt.

Die Methode der angepassten Geschwindigkeiten führt bei insgesamt 24 der oben angeführten Kombinationen zum Ziel. Die Züge 52413, 53124, 53142, 53412, 54213 und 54231 lassen sich aber auch mit diesem Trick nicht zusammenstellen.

Die Gewinner der fünf Bechersets »Balance« sind Martin Fuchs, Obernburg; Susanne Rothammer, München; Heinz Rauch, Pforzheim; Markus Linsenmann, Karlsruhe; und Christoph Paesler, Hannover.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

SINNESPHYSIOLOGIE

Tierischer Scharfsinn

Wie ein Rotkehlchen das Magnetfeld sieht, die Fledermaus sich ein Bild ihrer Umgebung erschreit oder der Hammerhai die Nervenimpulse seiner Beute erspürt – die Wahrnehmungswelten vieler Tiere gehen über unsere Sinnesleistungen weit hinaus.

Von Pia Prasch

Bakterien, Vögel, Wale, Meeresschildkröten und Bienen nutzen zur Orientierung das Magnetfeld der Erde. Im Schnabel von Tauben fand man Magnetitkörnchen, die ihnen als »Kompassnadeln« dienen können. Einen guten Überblick über die Magnetfeldorientierung im Tierreich haben drei Schülerinnen eines Berliner Gymnasiums zusammengestellt (http://people.freenet.de/magnetfeld/).

Neue Forschungsergebnisse brachten nun ans Licht, dass Rotkehlchen eine Art Kompass im rechten Auge tragen. Anscheinend reagieren Fotorezeptoren im Auge auf das Magnetfeld, das dadurch für die Vögel im Wortsinne sichtbar wird. Das eigentlich sehr einfache Experiment, das zu dieser Erkenntnis führte, wird auf der Internetseite der Ruhr-Universität Bochum vorgestellt (http://www.ruhr-uni-bochum.de/aktuell/magnetsinn.htm).

Rochen und Haie besitzen Organe, mit denen sie sich im Stockdunkeln an den elektromagnetischen Feldern des Meeresbodens orientieren können. Sie detektieren Spannungen in der Dimension von millionstel Volt. So können sie sogar elektrische Impulse, die im Nervensystem und in den Muskeln von Beutetieren entstehen, wahrnehmen. Mehr über dieses spannende Phänomen verrät das Video »Hammerhai mit Antenne«. Der Film »Klapperschlange unter Strom« zeigt, wie Klapperschlangen die statische Elektrizität der Erdatmosphäre zum Beutefang nutzen, indem sie sich mithilfe ihres »Rasselschwanzes« selbst aufladen und so ionisierte Duftmoleküle bevorzugt auf ihre empfindsame Zunge lenken. Unter www.zdf.de/ZDFde/inhalt/7/0,1872,1021575,00.html sind beide Filme zugänglich.

Einige Fischarten, wie zum Beispiel Zitterwels, Zitterrochen und Zitteraal, senden elektrische Stromstöße aus, mit denen sie kleinere Beutetiere lähmen oder töten, Feinde abwehren und sich im trüben Wasser orientieren. Details findet man in der online abrufbaren Datei www.biologie.uni-muenchen.de/docs/2002/04/0901ab10-9747-11d7-b7b4-0090278fdd27.pdf.

Echoortung ist eine weitere Sinnesleistung, die uns nicht unmittelbar zugänglich ist. Fledermäuse entnehmen dem Echo selbst entsandter Ultraschallwellen Informationen über Art und Aufenthaltsort von Beutetieren sowie über die räumliche Struktur ihrer Umgebung. Mit einem Detektor wurde der Ruf einer Fledermaus für den Menschen hörbar gemacht (www.g-o.de/geo-bin/frameset.pl?id=00001&frame1=titelgo.htm&frame2=menue04.htm&frame3=kap4/40fc0145.htm). Auch Zahnwale verfügen über ein raffiniertes Schallerzeugungs- und -empfangssystem. Tonbeispiele zeigen, dass die Ultraschall-Laute artspezifisch sind (http://home.t-online.de/home/whaletalk/vortra2.htm).

Robben können mithilfe ihrer Barthaare (Vibrissen) so genannte hydrodynamische Spuren lesen, die ihre Beutetiere im Wasser hinterlassen. Zur Orientierung im Meer nutzen sie ihre Fähigkeit, feinste Unterschiede im Salzgehalt des Meerwassers zu schmecken (www.hr-online.de/fs/abenteuererde/thema1-021204.html).

Wer zu guter Letzt noch in seine eigene Sinneswelt abtauchen will, erfährt unter www.g-netz.de/Der_Mensch/sinnesorgane/index.shtml, wie unsereins die Welt wahrnimmt. ◁

Die Autorin ist Diplombiologin und Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

EDMUND WEISS

Die großen Ohren helfen dem Kaukasischen Langohr (www.nhm-wien.ac.at/d/wissenswertes/fledermaus.html) bei der Echoortung.

DOUG PERRINE / SEAPICS.COM

BRANDON D. COLE / CORBIS

Im Kopf des Hammerhais (links) sitzen die Magnetfeldrezeptoren (www.hai.ch/cgi-bin/Sharks/sconvd.pl?D+Sphyrna.lewini). Selbst blinde Robben können sich mit ihren Vibrissen orientieren (rechts; www.marine-mammals.de/seehunde/results/prey.htm).

MATHEMATISCHE BIOLOGIE

Der Oberaffe

Ist Demokratie unter Tieren möglich? Ja, sagen zwei Forscher aus Brighton. Und sie rechnen auch gleich nach, dass sie für das Gemeinwohl besser ist als die überall zu beobachtende Diktatur.

Von Christoph Pöppe

GETTY IMAGES

Im Geäst der Bäume regte sich vielfältig ein Gewimmel von Köpfen, Beinen, Händen und Schwänzen. Eine Affenversammlung wählte ihren Oberaffen. … Eine solche Wahl ist … ein Ereignis mit sehr lebhaften Begleiterscheinungen. Zuerst erhebt sich ein entsetzliches Geschnatter, sodass keiner mehr verstehen kann, was der andere sagt, denn das ist bei der Wahl auch gar nicht nötig. Dann fangen sie an, sich zu beißen, zu prügeln und zu Knäueln zu ballen, bis sich Knäuel um Knäuel löst und aus dem letzten Knäuel der also gewählte Oberaffe aufsteigt. So war es auch dieses Mal, und der Oberaffe des jungen Tages hieß Krakelius Kreckeckeck.

»Ich übernehme jetzt die Regierung«, sagte Krakelius Kreckeckeck und fletschte die Zähne. »Eine Regierung besteht darin, dass sie anderen Beschränkungen auferlegt …«

»Wir wollen keine Beschränkungen, wir wollen Freiheit!« brüllten die Affen.

»Maul halten!« sagte Krakelius Kreckeckeck, »es gibt keine Freiheit für Affen … Ihr müsst beschränkt werden, und ich bin schon beschränkt, weil ich amtlich beschränkt bin. Dafür bin ich der Oberaffe!«

Manfred Kyber
»Der Oberaffe«

Demokratie im Tierreich? Das kann doch gar nicht funktionieren. Sollen die Affen etwa Stimmzettel ausfüllen und dann auszählen, wer die Mehrheit der Stimmen bekommen hat? Eine Regierungsbildung findet durch Prügeln und Beißen statt – so die Standardweisheit, welche die Verhaltensforscher durch eine überwältigende Fülle von Beobachtungen bestätigt finden.

Vielleicht haben die Biologen da, durch eine überzeugende Theorie geleitet, nur nicht richtig hingeschaut. Gewisse Einzelbeobachtungen lassen den Schluss zu, dass Abstimmungen und Mehrheitsentscheidungen unter Tieren sehr wohl vorkommen. Affenhorden wandern in die Richtung, in die eine Mehrheit der Mitglieder strebt. Afrikanische Elefantinnen kommen durch Austausch tiefer Grunzlaute zu einer Mehrheitsentscheidung darüber, was als Nächstes zu tun ist. Schwäne fliegen auf, wenn die Anzahl der Kopfbewegungen, die ein entsprechendes Bestreben anzeigen, eine gewisse Schwelle überschreitet.

Inzwischen gibt es auch systematische Beobachtungen, die in dieselbe Richtung weisen. Larissa Conradt von der biologischen Fakultät der Universität von Sussex in Brighton (England) hat ausgezählt, dass eine Gruppe von Rothirschen sich regelmäßig dann in Bewegung setzt, wenn ungefähr 62 Prozent der erwachsenen Gruppenmitglieder aufstehen. Menschengruppen treffen häufig Mehrheitsentscheidungen auf diese wortlose und informelle Art: Der Restaurantbesuch oder die Rast auf der Wanderung werden beendet, wenn eine Mehrheit der Mitglieder einen entsprechenden Wunsch durch Gesten zu erkennen gibt.

Solange die Datenbasis an Beobachtungen jedoch noch so mager ist: Wie wäre es mit einer Theorie, die nachweist, dass eine demokratische Entscheidungsfindung besser für die Affenhorde ist als eine despotische?

»Ferner sollen alle Affen nicht herumlungern, sondern fleißig Früchte sammeln. Das sind unsere Vorräte für die Zeiten der Not.«

»Wir wollen fressen und nicht sammeln«, schrien die Affen.

»Das könnte euch so passen«, sagte Krakelius Kreckeckeck, »nur immer so von der Pfote in die Schnauze zu leben; aber das kann eine Regierung nicht dulden. Ihr sollt sammeln, und was ihr sammelt, sollt ihr mir bringen. Eine richtige Affenregierung steckt alle Früchte ein, die andere sammeln.«

»Um sie selbst zu fressen!« brüllten die Affen.

»Jawohl«, schrie Krakelius Kreckeckeck, »und wenn ich alles selber fresse, so fresse ich es amtlich. Dafür bin ich der Oberaffe!«

Plötzlich verstummte das Geschnatter.

Aus dem Dickicht heraus trat im elegant gestreiften Fellkleid und mit sehr erbostem Gesichtsausdruck die Tigerin, Frau Miesimissa Pfotenpuff.

»Was ist das für ein scheußlicher Lärm?« fauchte Frau Miesimissa Pfotenpuff, »meine süßen Kinder, die kleinen Pfotenpuffs, können nicht schlafen vor eurem dummen Geschnatter.«

Es versteht sich, dass eine Oberaffenentscheidung für den Oberaffen selbst besser ist als eine demokratische. Das gilt auch dann, wenn er seinen Untertanen nichts wegfressen kann. Larissa Conradt und ihr Chef Timothy Roper betrachten in einem Artikel in »Nature« ein realistischeres Szenario: Die Affenhorde vergnügt sich bei gemeinsamem Fressen. Ist es besser, wenn der Oberaffe das Signal zum Aufbruch gibt oder wenn eine Mehrheit darüber entscheidet?

Wenn ich zu lange beim Fressen bleibe, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass mich die Tigerin erwischt, denkt sich der einzelne Affe. Breche ich zu früh auf, werde ich nicht satt. Beides ist ungünstig für mich und vor allem für meine Chancen bei der hübschen Äffin nebenan. Und Letztere sind das Einzige, was zählt. Denn im Verlauf der Evolution setzt sich ein – despotisches oder demokratisches – Entscheidungsverfahren nur dann durch, wenn diejenigen, die es praktizieren, mehr Nachkommen haben als andere.

Zwischen den beiden unangenehmen Extremen Verhungern (bei Fresszeit null) und Tiger (bei sehr langer Fresszeit) gibt es eine optimale Fresszeitdauer. Die ist allerdings unterschiedlich für die verschiedenen Affen; manche sind eben hungriger als andere. Trotzdem muss die Gruppe zusammenbleiben; denn ganz alleine im Urwald ist ein Affe noch viel gefährdeter als im Verband. Wegen dieses Zusammenhalts muss jeder einzelne Affe den Nachteil in Kauf nehmen, dass der Zeitpunkt des gemeinsamen Aufbruchs von seinem persönlichen Lieblingszeit-

MAURITIUS

punkt abweicht: Entweder wird er nicht satt, oder er setzt sich ohne Not – da er schon satt ist – der Gefahr des Gefressenwerdens aus.

Wie schwer wiegt dieser Nachteil? Conradt und Roper machen zunächst die vereinfachende Annahme, er sei proportional der Abweichung zwischen der allgemeinen Aufbruchszeit und der persönlichen Lieblingszeit, unabhängig vom Vorzeichen. Wenn der Oberaffe satt ist, bläst er zum Aufbruch, also ist sein persönlicher Nachteil gleich null. Aber seine Untertanen müssen mit aufbrechen, denn er bläst amtlich; folglich müssen sie über das für sie Unvermeidliche hinaus hungern oder vor dem Tiger zittern.

Optimal wäre ein Verfahren, das auf das größte Glück der größten Zahl abzielt, also die Summe der Nachteile aller Affen minimiert. Unter den genannten vereinfachten Voraussetzungen ist ein solches Verfahren ohne weiteres anzugeben: Man breche auf, sowie mindestens die Hälfte der Affen aufbrechen will. Es ist nicht schwer zu beweisen, dass diese Entscheidung der Gesamtheit der Affen besser bekommt als die Entscheidung eines Oberaffen, einerlei, wer das ist.

»Wir kratzen uns, wenn es uns juckt«, schrien die jungen Mädchen und jungen Männer, »du kratzt dich ja auch.« – »Das ist etwas anderes«, sagte Krakelius Kreckeckeck, »wenn es mich juckt, so juckt es mich amtlich, und wenn ich mich kratze, so kratze ich mich amtlich. Dafür bin ich der Oberaffe!« Dabei juckte es ihn, und er kratzte sich amtlich.

Aus der Tiefe des Dschungels klang leise klagend ein miauendes Weinen, mehrstimmig.

»O Himmel«, sagte Miesimissa Pfotenpuff, »meine süßen Kinder, die ihr gestört habt, weinen nach mir. Sie sind hungrig. Ich muss nach Hause. Aber ich schicke euch meinen Mann, wenn er von der Jagd zurückkommt. Er soll die ganze Angelegenheit untersuchen. Er wird euch was, ihr Affenbande!«

Die vereinfachende Annahme, es komme nicht darauf an, ob man eine Viertelstunde zu früh oder zu spät aufbricht, ist natürlich höchst unrealistisch. Es muss jedem Affen klar sein, dass vor allem in Gegenwart der Tigerin eine Viertelstunde Zittern wesentlich schlimmer ist als eine Viertelstunde Nichtfressen. Bemerkenswerterweise ist jedoch die obige Modellrechnung auf diesen Fall verallgemeinerbar.

Es genügt, wenn bei der »Abstimmung« die Gruppenmitglieder, die viel zu verlieren haben, ihr Votum entsprechend intensiver abgeben. Nehmen wir an, es sei doppelt so unangenehm, zu spät aufzubrechen wie zu früh. Dann müssen die Aufbruchswilligen jeweils zwei Stimmen abgeben statt einer, das heißt doppelt so viel hampeln, Lärm machen oder was immer als Stimmabgabe gilt; aber der Aufbruch findet nach wie vor dann statt, wenn die Zahl der abgegebenen Stimmen der halben Mitgliederzahl entspricht. Dabei ist allerdings vorausgesetzt, dass alle Affen ehrlich sind und keiner von ihnen nur deshalb lauter schreit, weil er seine Vorstellung durchsetzen will.

Im umgekehrten Fall (Aufbrechen ist gefährlicher als Zuwarten) entspricht das einer guten demokratischen Praxis unter Menschen: der Zweidrittelmehrheit. Offensichtlich hielten die Väter des Grundgesetzes die potenziellen Gefahren einer Verfassungsänderung für größer als die jenigen, die von einem Beharren auf den bisherigen Verhältnissen ausgehen. ▷

MAYWALD / PICTURE PRESS

Fressen oder aufbrechen? Die Neigung dazu ist je nach Affe und dessen Sättigungsgrad verschieden.

▷ Es könnte auch sein, dass beispielsweise eine halbe Stunde Nahrungsentzug nicht nur doppelt so schlimm ist wie eine Viertelstunde, sondern noch schlimmer. Oder vielleicht sind die individuellen Lieblingszeiten nicht irgendwie zufällig verteilt (sodass auf die Dauer das Schicksal, zu früh oder zu spät aufbrechen zu müssen, alle gleichmäßig trifft), sondern es gibt genügsame und verfressene Affen: Den einen kann es nie früh genug losgehen, und die anderen kriegen eigentlich nie genug. Nehmen wir an, es gebe eine große Mehrheit verfressener Affen, aber die Lieblingszeit des Oberaffen sei ungefähr gleich dem Durchschnitt der Lieblingszeiten: Dann ist eine despotische Entscheidung besser für das Gemeinwohl als eine demokratische.

Aber auch nur dann. Der optimale Aufbruchszeitpunkt ist der Durchschnitt der individuellen Lieblingszeitpunkte. Dagegen ist der Zeitpunkt, der durch die Mehrheitsentscheidung zustande kommt, nicht der Durchschnitt, sondern der Median. Das ist nämlich ein Wert, der größer ist als die Hälfte aller vorkommenden Werte und kleiner als die andere Hälfte. Nur wenn die individuellen Gefräßigkeiten sehr ungleichmäßig verteilt sind, weichen diese beiden Mittelwerte erheblich voneinander ab.

Die Affen beschlossen in sehr begreiflicher Weise, die Ankunft des angekündigten Herrn Pfotenpuff lieber nicht abzuwarten. Kaum war Frau Miesimissa Pfotenpuff verschwunden, als eine regellose Flucht einsetzte, ein wirres Gewimmel von Köpfen, Armen, Beinen und Schwänzen – als erster und allen weit voran floh Krakelius Kreckeckeck, denn er floh amtlich. Dafür war er der Oberaffe.

Wem Gott ein Amt gibt, dem gibt er angeblich auch Verstand. Ist es evolutionär vorteilhaft, den Entscheidungen eines Oberaffen zu folgen, weil die regelmäßig besser sind als demokratische? Schwerlich. Man kann zwar ohne weiteres davon ausgehen, dass die Affen ihre Situation falsch einschätzen, dass also ihr Lieblingszeitpunkt nicht der wirklich optimale Zeitpunkt ist. Aber bei einem demokratischen Entscheidungsverfahren mitteln sich die Fehler aus – zumindest die nicht-systematischen. Um die Qualität einer demokratischen Entscheidung zu übertreffen, müsste der Oberaffe über geradezu unglaubliche Klugheit verfügen. Genauer: In einer Gruppe von n Affen müsste der Fehler, den der Oberaffe zu machen pflegt, um den Faktor $\sqrt{n}$ kleiner sein als der Standardfehler des Durchschnittsaffen.

Wenn aber Demokratie so viel besser ist als Despotenherrschaft: Warum gibt es dann überhaupt noch Oberaffen? Conradt und Roper bieten im Rahmen ihres Modells immerhin eine Erklärung dafür an, dass ein einmal etablierter Oberaffe sich auf seinem Posten hält. Dazu müssen sie nicht einmal voraussetzen, dass der Oberaffe der Stärkste ist; es genügt, wenn er den anderen nicht von vornherein klar unterlegen ist.

Dem Argument liegt, wie oben, eine Kosten-Nutzen-Rechnung zugrunde. Ein Oberaffe hat durch seine Absetzung weit mehr zu verlieren, als ein einfacher Bürger durch die Einführung der Demokratie gewinnen kann. Entsprechend ist seine Bereitschaft, Kraft, Zeit und körperliche Unversehrtheit aufs Spiel zu setzen – alles Kosten in der Lebensbilanz eines Affen –, höher als die eines einfachen Untertanen. Wenn der also dem Oberaffen den Gehorsam verweigert, wird er im darauf folgenden Zweikampf im Allgemeinen den Kürzeren ziehen. Ganz anders sieht es aber aus, wenn sich viele Untertanen auf einmal gegen den Despoten zusammenrotten. Nur sind echte Revolutionen in einer Affenhorde wohl eher selten.

Die evolutionäre Frage ist damit noch nicht beantwortet (und wird von Conradt und Roper auch nicht angesprochen): Wenn die Demokratie die Gesamt-Fitness einer Affengruppe so sehr befördert, warum sind die Oberaffen nicht schon längst ausgestorben? Eine denkbare Erklärung wäre, dass Oberaffen mehr Kinder zeugen als andere. Die können zwar offensichtlich nicht alle Oberaffen werden; aber unter der etwas gewagten Hypothese, dass in den Genen eines Oberaffen auch die Bereitschaft, sich unterzuordnen, steckt, würde der Oberaffe regelmäßig seinem Nachfolger die richtige Sorte Untertanen bereitstellen. Dadurch würde sich die Institution des Oberaffen über die Generationen hinweg stabilisieren.

Na ja, und warum es überhaupt noch Obermenschen gibt, ist sowieso eine ganz andere Frage.

»Sehr weise und sehr lichtvoll ist diese Welt«, sagte der Elefant Nalagiri Lappenhaut und wechselte die Stellung seiner Säulenbeine, um nachzudenken, das breite Haupt nach Osten gewendet, »aber sehr unweise und sehr geräuschvoll sind viele Geschöpfe. Sehr unweise und sehr geräuschvoll ist insbesondere das Affentheater auf dieser Erde, und am unweisesten und am geräuschvollsten sind die Oberaffen.« ◁

Christoph Pöppe ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft. Für die Lösung kleinerer Familienkonflikte bevorzugte er früher das Oberaffenprinzip.

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Das Manfred Kyber Buch. Tiergeschichten und Märchen. Von Manfred Kyber. Rowohlt, Reinbek 1999.

Group decision-making in animals. Von Larissa Conradt und Timothy Roper in: Nature, Bd. 421, S. 155, 9. Januar 2003.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Verhängnisvoller Gletscherschwund

Die globale Erwärmung lässt auch im Himalaya die Gletscher schmelzen. Die Folgen sind fatal: Kurzfristig drohen verheerende Überschwemmungen durch Ausbrüche anschwellender Gletscherseen, langfristig ist die Wasserversorgung großer Teile Ostasiens gefährdet.

WEITERE THEMEN IM AUGUST

Paralleluniversen

Nicht nur in Science-Fiction-Romanen ist unser Universum bloß eines unter vielen. Auch Kosmologen und Quantentheoretiker postulieren parallele Welten.

Sehtraining für Teilblinde

Nach einem Hirninfarkt oder einer Hirnverletzung verlieren viele Patienten Teile ihre Gesichtsfeldes. Durch ein spezielles Sehtraining lassen sich die Ausfälle verringern.

Hilfsbereitschaft unter Fremden

Die Wahrscheinlichkeit, mit der Großstädter einem Unbekannten in einer Notlage beistehen, variiert beträchtlich von Ort zu Ort. Eine aufwendige Vergleichsstudie deckt erstaunliche Zusammenhänge auf.

Der Angriff auf das Genom

Die Geschichte der Genomforschung der letzten 25 Jahre liest sich auch wie ein Wettlauf mit unerwartet frühen Zwischensiegen. An allen Fronten haben Großeinsätze die Erkenntnisse forciert.

Warum Influenza-Viren Sieger bleiben

Genetische Besonderheiten lassen Grippe-Erreger immer wieder in neuem Kleid erscheinen. Besonders gefährlich wird es, wenn zwei verschiedene Virus-Typen aufeinander treffen.